Constantin **AGOURIDAS** • Jean-Claude **BERNIER** • Danièle **OLIVIER** • Paul **RIGNY**

CHIMIE ET... JUNIOR

Collection dirigée par Bernard **BIGOT**, Président de la Fondation Internationale de la Maison de la Chimie

LA Chimie ET LA Sécurité

des personnes, des biens, de la santé et de l'environnement

edp sciences

Fondation de la Maison de la Chimie

Les textes de cet ouvrage sont majoritairement inspirés des livres *Chimie et expertise, sécurité des biens et des personnes* (Collection Chimie et…, EDP Sciences, 2014) et *Chimie et expertise, santé et environnement* (Collection Chimie et…, EDP Sciences, 2015) par :

Constantin Agouridas : directeur Programmes et Projets à la Fondation de la Maison de la Chimie, ex-directeur de Recherche Aventis et Galderma, ex-professeur et directeur de Relations Industrielles à l'ENSCP

Jean-Claude Bernier : professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur de l'Institut de Chimie du CNRS

Danièle Olivier : professeure des universités, vice-présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie, ancien directeur de l'ENS Chimie-ParisTech

Paul Rigny : ancien rédacteur-en-chef de *L'Actualité Chimique*, ancien directeur de l'Institut de Chimie du CNRS

Pour le coin des jeux, **Michel Criton** est professeur certifié de mathématiques. Il est président de la Fédération française des jeux mathématiques et membre de la rédaction des magazines Tangente et Spécial Logique.

Illustrations (conception - production) : Cécile Parry – www.swities.com

Composition : Patrick Leleux PAO

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-2013-9 – ISSN : 2426-0185

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinés à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2016

SOMMAIRE

Introduction 4

PARTIE 1 CHIMIE ET POLICE SCIENTIFIQUE

1. La chimie mène l'enquête 6
2. À la poursuite des fabricants de drogue : le profilage 19
3. La lutte antiterroriste 25
4. Faux : vous êtes sûrs ? La vie des œuvres d'art 37

PARTIE 2 CHIMIE ET PRODUCTION DU RISQUE INDUSTRIEL, SANITAIRE ET ENVIRONNEMENTAL

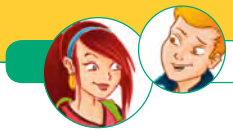
5. Pour une industrie chimique propre et durable 50
6. Les nano-objets : un avenir prometteur mais sous contrôle 59
7. Les faibles doses des polluants sont-elles dangereuses ? 69
8. La bataille de l'eau propre 80

PARTIE 3 LES CHIMISTES AU SERVICE DE L'ENQUÊTE ET DE LA PRÉVENTION DU RISQUE

9. Une enquête explosive 90
10. Une enquête après accident industriel 108
11. Les chimistes au service de la sécurité des personnes, des biens, de la santé et de l'environnement 120
12. Les fiches métier 123

PARTIE 4 LE COINDES JEUX

13. Énigmes 134
14. Mots croisés 142



INTRODUCTION

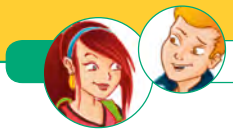
Nous avons crée la collection **Chimie et junior** pour faire découvrir **agréablement** aux **collégiens et aux lycéens** les applications des Sciences de la chimie dans leur vie quotidienne, notamment dans des domaines qui les intéressent et qui sont porteurs d'avenir. Nous espérons ainsi les **aider** à mieux choisir et préparer leur **avenir professionnel**.

Les deux premiers volumes de cette collection ont été consacrés à la **Chimie dans le sport** (2014) et la **Chimie dans les technologies de l'information et de la communication** (2015).

La sécurité dans tous les domaines est aujourd'hui au centre des préoccupations de tout le monde, quel que soit l'âge. L'ouvrage plonge d'abord le lecteur au cœur des enquêtes de police scientifique pour élucider des crimes, démanteler des trafics de drogue, démasquer des grandes fraudes ou prévenir des attentats terroristes. La seconde partie montre comment il est maintenant possible de mieux protéger notre santé et notre environnement.
Puis le lecteur, en jouant les Sherlock Holmes, découvrira comment utiliser ses connaissances en chimie pour bien conduire l'enquête. Dans cette promenade à travers le monde de la police, de l'industrie et de la protection de l'environnement, on pourra comprendre la diversité et l'intérêt des métiers qui sont associés à la croissance de cette exigence sécuritaire.

Cet ouvrage a été testé sur des collégiens (merci à Max, Baptiste et Laura). Nous espérons qu'il plaira à leurs camarades, et qu'il sera à la base de discussions enrichissantes avec leurs professeurs et leurs parents.

Danièle Olivier
Vice-Présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie



LA CHIMIE MÈNE L'ENQUÊTE

Les chimistes au service de la vérité, un avant-goût

Jusque dans les années 1970, les chimistes étaient en première ligne pour l'exploitation des indices découverts sur les scènes de crime (poisons, explosifs, stupéfiants, accidents de la route, balistique et munitions…).

Puis la chimie invente et/ou contribue au ressort de nouvelles technologies lesquelles, progressivement, vont compléter le terrain d'investigation policière, à savoir :

– **le test ADN**, roi de l'investigation jusqu'à les années 2000 et encore aujourd'hui ;

– **l'informatique** dont la lutte contre la cybercriminalité qui permet d'identifier les délinquants (fraude de carte bleue, images pédophiles, atteinte à la vie privée, diffamation) et la protection des données personnelles.

La ***cybercriminalité*** est l'ensemble des infractions pénales qui sont commises sur les réseaux informatiques et en particulier sur Internet.

Croque la pomme…

La mort par poisons n'est pas récente lorsque l'on parcourt l'Histoire, l'arsenic considéré comme le roi des poisons a été plusieurs fois utilisé dans de nombreux empoisonnements célèbres. De même que les intoxications au monoxyde de carbone, citons la mort d'Émile Zola en 1902, victime de ce gaz toxique pendant son sommeil.

Figure 1

Marie Lafarge, accusée d'empoisonnement de son mari à l'arsenic.

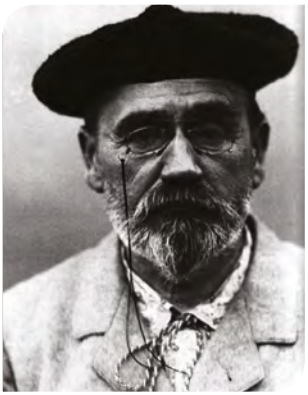


Figure 2

Émile Zola est décédé suite à une intoxication à l'oxyde de carbone.

Figure 3

L'arsenic, substance incriminée dans de nombreuses affaires d'empoisonnement.

La chimie pour prévenir et punir

Pour lutter contre la délinquance, deux actions sont menées de front : la prévention et la répression dont voici deux exemples illustratifs.

La prévention

Lors de soirées festives, des violeurs potentiels vont discrètement glisser dans le verre de leurs victimes une substance incolore et inodore. Il s'agit du « gamma-hydroxybutate » (GHB) qui provoque un état hypnotique et amnésique.

La victime est alors démunie de toute résistance et d'état de conscience.

Figure 4

L'utilisation du gamma-hydroxybutate (GHB) à l'insu de la victime.

Des chimistes ont créé une bandelette qui, discrètement plongée dans le verre, peut signaler la présence d'une telle substance.

À titre **préventif**, des précautions complémentaires sont à prendre, à savoir :

→ ne pas lâcher son verre, vérifier que les canettes ou les petites bouteilles parviennent fermées, ne jamais accepter de verre non servi devant soi…

La répression

Au cours d'une fête d'anniversaire, un groupe d'amis se réunit, consomme de l'alcool et du cannabis.

Au retour, le conducteur consommateur perd le contrôle du véhicule qui va percuter un poteau électrique. Heureusement, pour cette fois, pas de victime mais des dégâts matériels.

La police arrive. Après investigation des lieux, des prélèvements sont réalisés dont notamment quelques cheveux du conducteur qui sont expédiés au laboratoire scientifique ; les résultats sont irréfutables : présence de drogue… la justice tranchera…

Figure 5

Les cheveux pour tracer la présence de drogue.

Il faut savoir qu'aujourd'hui les méthodes analytiques en chimie ont tellement évolué que l'on est capable de détecter des substances étrangères au niveau du nano gramme.

Évolution technologique en analyse

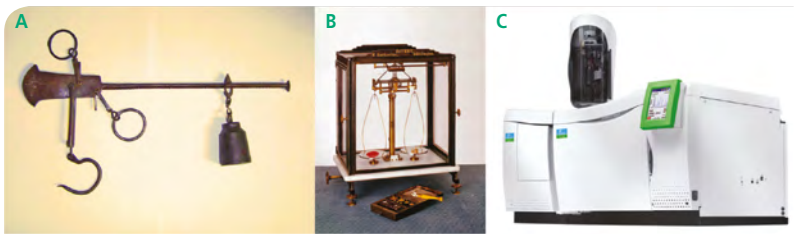


Figure 6 **A)** Balance romaine ; **B)** balance de Sartorius ; **C)** instrument CG/MS (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse) (Perkin Elmer, modèle SQ8).
Source : A) Wikipedia, Licence CC-BY-SA-3.0, Antony B. ; B) Science Museum/Science & Society Picture Library ; C) Clarus RSQ 8 CG/MS – Perkin Elmer.

Au fil des progrès des instruments de mesure, la chimie analytique peut voir aujourd'hui ce qui était invisible précédemment. Longtemps limités à l'échelle du gramme, puis du milligramme, plusieurs ordres de grandeurs décroissantes ont été atteints ces dernières années (*Figure 6*).

Rôle de la police et de la justice

Dans le cas de la **prévention,** la police est maîtresse de ses décisions pour informer, former et sensibiliser le grand public sur les risques encourus en fonction des cas et de son expérience.

En revanche, dans le cas d'une **répression**, la police, ses enquêteurs et ses laboratoires scientifiques travaillent pour donner à la justice, c'est-à-dire aux magistrats, tous les documents d'analyse ou d'expertise qui leur sont nécessaires.

Crimes et chimie

Dans le cas de la répression criminalistique, parcourons ensemble un panorama de différents domaines d'intervention où la chimie va contribuer à l'avancement de l'enquête.

La *figure 7* illustre les différents domaines de la criminalistique.

Figure 7

Illustration des différents domaines de la criminalistique.

La ***criminalistique*** est l'ensemble des techniques mises en œuvre par la justice et la police pour établir la preuve d'un délit ou d'un crime et d'en identifier son auteur.

Approfondissons ensemble les cas suivants.

Les incendies-explosions

Figure 8

Simulation d'un incendie sur un entrepôt intégralement instrumenté.

Suite à l'explosion d'un hangar situé près d'un aérodrome, la police intervient sur place pour comprendre d'où est parti le sinistre et rechercher des substances accélératrices du feu, déposées volontairement ou par un jeu de hasard.

Un exemple qui mérite encore d'être complètement élucidé est l'explosion de l'usine d'AZF à Toulouse en 2001.

Le nitrate d'ammonium s'était montré comburant (brûle avec…) en 1921 à Oppau en Allemagne, lors d'une explosion d'un tas de cinq cents tonnes pris en masse que l'on avait essayé de désagréger à l'aide d'un bâton de dynamite.

Cet accident causa le décès de près de six cents personnes.

Lors de l'accident d'AZF, des produits de nature chlorée auraient pu jouer le rôle de la dynamite utilisée à Oppau, dans un dépôt de nitrate d'ammonium.

Identification de traces de sang

Le signalement d'une gardienne d'immeuble disparue depuis quelques jours a été fait par les locataires inquiets. Quelques jours auparavant, certains ont entendu une violente dispute provenant de l'appartement de cette dernière et depuis, plus aucun signe de présence. Un vêtement féminin tâché de sang a été retrouvé dans l'appartement.

Dans ce cas, il s'agit d'identifier d'infimes traces de sang sur les lieux. Dans d'autres cas, il s'agira d'en détecter sur une victime ou un agresseur.

Un produit chimique, le luminol, va être utilisé : grâce à sa réaction avec les ions de fer présents dans l'hémoglobine du sang, il produit par oxydoréduction un nouveau produit, lui luminescent, qui révélera par sa lumière la présence du sang.

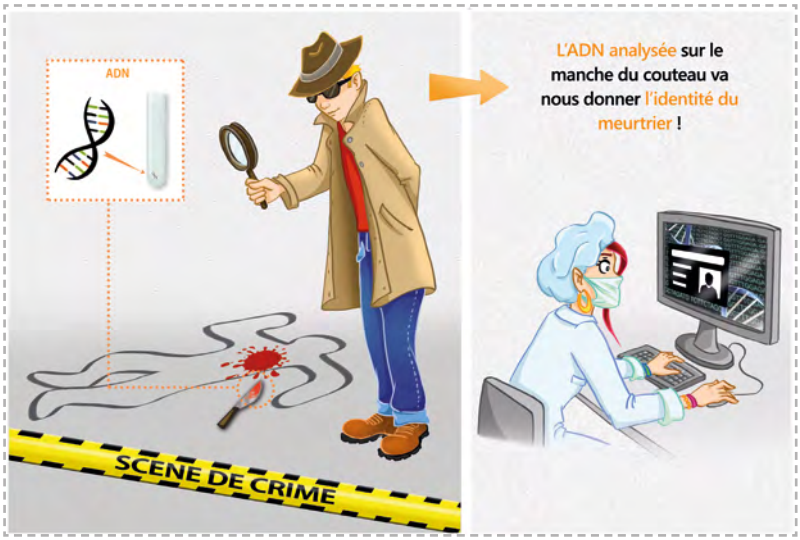


Figure 9

L'ADN parlera…

Remarque

Le principe est le même que la lumière émise par les lucioles, les nuits d'été, lumière produite par une réaction chimique. Il s'agit de bioluminescence.

Il ne restera plus qu'à prélever des échantillons pour une analyse ADN : ainsi, la victime ou l'agresseur seront formellement identifiés à condition que l'on dispose de traces répertoriées.

Aujourd'hui, un nouveau produit plus performant que le luminol existe : il s'agit du « blue star ».

Sa sensibilité étant améliorée, il est capable de révéler des traces beaucoup plus infimes que le luminol.

Il permet de détecter à l'œil nu des traces de sang jusqu'à la dilution 1/10 000e.

Cela veut dire détecter des traces infimes ou microgouttes effacées ou minutieusement lavées avec ou sans détergent.

Figure 10

Le BLUESTAR® FORENSIC pulvérisé sur le lavabo révèle la présence de sang.

Identification du sang

Après avoir repéré et prélevé les tâches de sang, il faut effectuer différentes analyses. Le sang étant de composition extrêmement complexe, il est très difficile d'aller chercher proprement et sans interférences la substance d'intérêt.

C'est pourquoi, le chimiste, avant toute analyse, va épurer le sang et extraire les substances d'intérêt.

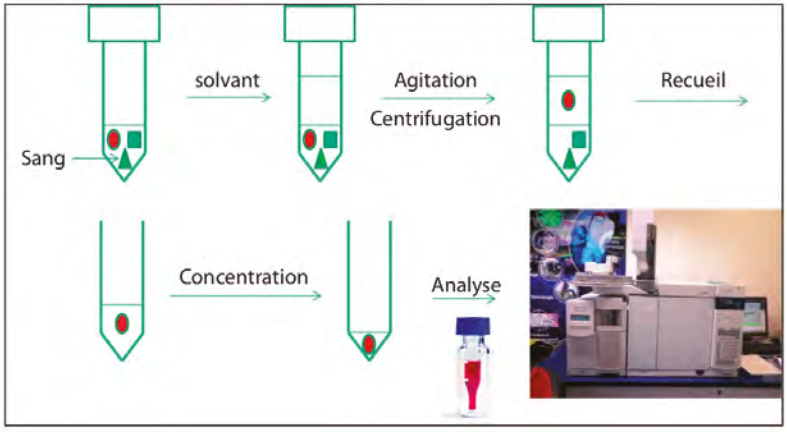


Figure 11

Principe d'extraction d'une substance dans le sang.

Après rajout d'un solvant, agitation et centrifugation, il va recueillir au fond de son tube de prélèvement, les substances à analyser en évitant, au mieux, les possibles interférences avec le contenu dense du sang...

Il ne reste plus qu'à séparer les différentes substances sur des colonnes dites de chromatographie.

Une colonne de silice (sable) va trier la migration des substances chimiques en fonction de leur forme, taille et de leurs propriétés physico-chimiques afin de les analyser.

La Chromatographie

Il s'agit de la réalisation d'un tri entre les différentes espèces moléculaires d'un mélange. On va ainsi forcer toutes les molécules à effectuer un parcours commun parsemé d'obstacles : certaines espèces franchiront aisément, d'autres auront plus de difficulté. À l'arrivée, il y aura un échelonnement.
Pour entraîner les molécules, il faut les véhiculer dans un fluide – la phase mobile – qui peut être soit liquide soit un gaz (*Figure 12*).

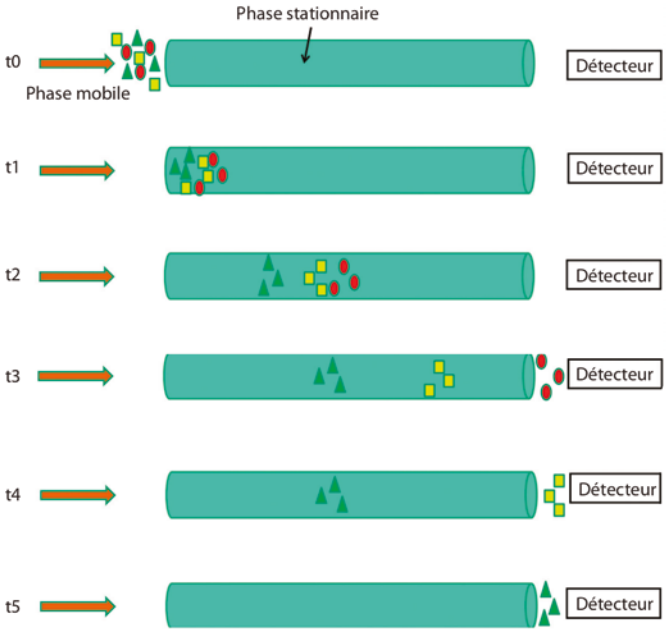


Figure 12

Principe de la chromatographie : les constituants du mélange sont séparés par différence de rétention sur une phase stationnaire, entraînés par une phase mobile. Le temps de rétention est caractéristique du composé.

L'obstacle à franchir, qui ne doit pas être entraîné par la phase mobile, doit être fixe et produire des effets reproductibles : il constitue la phase stationnaire. Cette dernière, le plus souvent emprisonnée dans une colonne, peut être un solide ou un liquide immobilisé sur un solide.
Le détecteur analytique va alors lister les différentes substances, leur nature et leur formule chimique.

Les cheveux à la recherche d'un indice ?

Bien que le sang soit la substance la plus utilisée pour la recherche des produits chimiques ingérés, les phanères sont de plus en plus analysés lors des enquêtes dans la mesure où ils peuvent nous fournir des informations critiques et complémentaires.

Phanère, du Grec « phaneros » : ce qui se voit ; c'est-à-dire ongles, poils et cheveux.

En effet, une fois le médicament ou le toxique « entré » dans le phanère, il y reste jusqu'à ce que ce dernier soit jeté ou détruit.

Ainsi en ce qui concerne les cheveux, leur étude peut permettre d'évaluer une chronologie des faits, voir entreprendre une datation approximative.

La vitesse de pousse d'un cheveu est d'environ un centimètre par mois. Si l'on trouve un produit ingéré à trois centimètres du cuir chevelu, c'est donc qu'il a été absorbé environ trois mois auparavant.

Remarque

C'est par exemple le cas des personnes consommant de la drogue (cocaïne, héroïne, hachich…).

De plus, cette technique permet de différencier les produits ingérés une fois, par rapport à des produits pris quotidiennement, lesquels par principe seraient présents tout le long de la tige du cheveu.

Exemple d'un cas de soumission chimique

Une femme dîne chez un ami. Au cours du repas, elle boit du rhum puis souffre de troubles visuels, de vertiges et fait un malaise.

Le lendemain, elle se réveille en sous-vêtements dans le lit de cet ami en ne conservant aucun souvenir de la nuit.

Elle porte plainte mais plusieurs jours après, ce qui rend toute tentative d'analyse du sang ou des urines caduque. L'ensemble des indices a certainement bien été éliminé depuis longtemps.

Dernier recours ?... les cheveux !

Une mèche de cheveux est cousue sur une feuille de papier sur laquelle est indiquée une échelle en centimètres (de gauche vers la droite), *figure 13*.

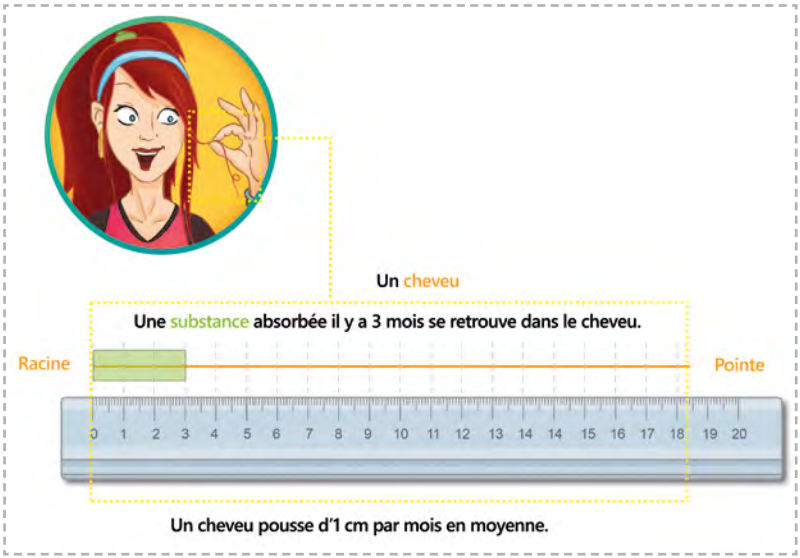


Figure 13

Tout ce que peut nous révéler un cheveu.

Comme les cheveux poussent d'environ un centimètre par mois, on en déduit que toute drogue ingérée le mois précédent doit se trouver entre un et deux centimètres en partant de la racine, sur la partie gauche de la figure.

Les résultats sont reportés sur la *figure 14*.

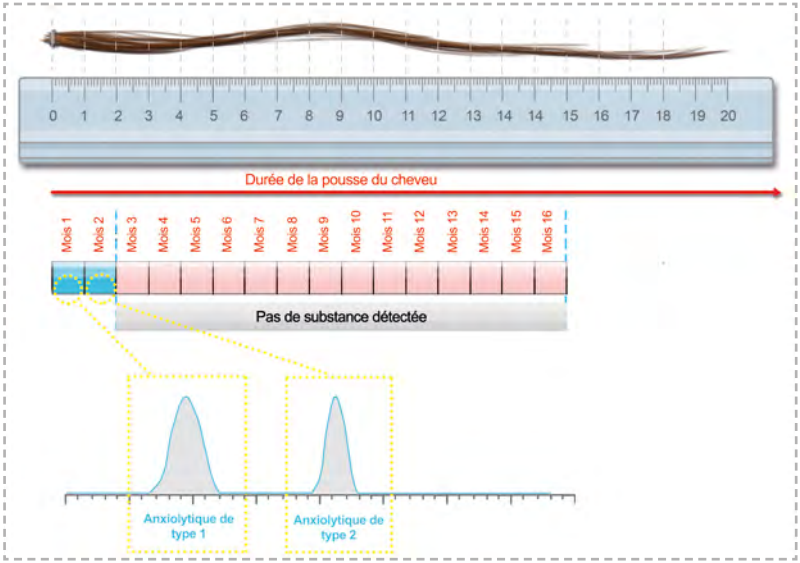


Figure 14

La figure met en évidence la présence d'anxiolytiques susceptibles d'être utilisés dans le cadre de la soumission chimique.

Comme le montre la *figure 14*, la victime a bien été exposée à deux agents hypnotiques et si on additionne les deux verres de rhum… nous pouvons aisément comprendre le malaise profond de cette dame.

Un ***anxiolytique*** est un médicament destiné à soigner les troubles de l'anxiété.

Et toujours plus d'applications

De nombreuses autres applications en chimie permettent d'obtenir des indices sur les scènes ou les personnages intervenant dans un crime. Par exemple :

– **les scotchs, les adhésifs** retrouvés dans les agressions à domicile, appelés en jargon policier les « saucissons » lorsque les victimes sont ficelées. Retrouvés chez les agresseurs, l'étude des colles peut établir une correspondance ;

– **les résidus de tirs :** lors de l'utilisation d'une arme à feu, des nuages se créent, liés aux poudres de propulsion et à l'amorce (plomb, baryum, antimoine généralement) et se dispersent sur les vêtements et les mains. Selon la densité de produits et la présentation morphologique, on peut savoir s'il s'agit de résidus de tir et même donner des éléments de proximité entre le porteur et le coup de feu ;

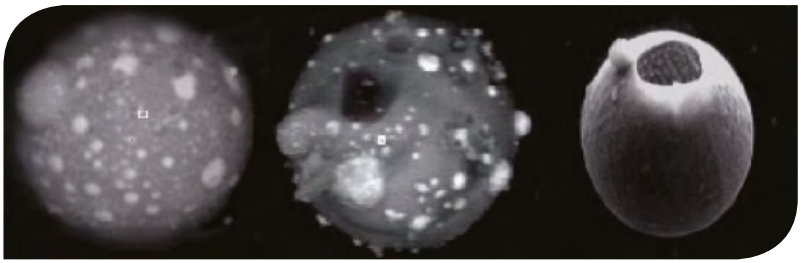
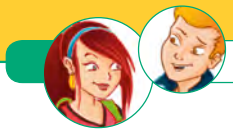


Figure 15

Quelques exemples de particules de résidus de tir.

– **le cannabis et autres drogues dites naturelles :** confirmer qu'il s'agit bien de drogue, déterminer le degré de pureté en principe actif, ce qui permet de situer le détenteur dans la chaîne de redistribution, et faire des liens entre les différents lots de drogue en comparant les taux d'impuretés et de solvants.

– …



Les pistes de l'avenir

Cependant, il reste encore des progrès à faire. On peut citer les améliorations suivantes à développer :

– **les délais de la réponse :** la garde à vue étant limitée légalement dans le temps, il faudrait être en mesure d'amener un maximum de preuves avant la fin de celle-ci.

Pour cela, il faudrait améliorer la miniaturisation (encore moins de matière exigée pour les analyses), le débit (encore plus de résultats et d'expériences dans le même laps de temps) ;

– **sur le plan scientifique :**
- augmenter la flexibilité des techniques analytiques et passer de certaines matrices (sanguines) à d'autres plus facilement exploitables comme la salive,
- atteindre le niveau de flair du chien. Malgré les progrès réalisés en termes de sensibilité des méthodes utilisées, nous sommes encore loin d'avoir atteint la capacité du chien à détecter certaines substances ou individus ayant participé à des événements recherchés.

Mais sans mesure objective, comment condamner un individu simplement sur le témoignage d'un chien ?

– **sur le plan gestion humaine :** eu égard à la diversification de métiers scientifiques intervenant dans une enquête, il faudrait être en mesure d'initier et soutenir le travail par équipe et faire travailler pour le même objectif, les différents métiers pluridisciplinaires : **enquêteurs, juges d'instruction, chimistes, biologistes, physiciens, médecins légistes…**

Conclusion

La chimie intervient à différents niveaux dans le cadre d'analyses dans les enquêtes policières. La précision et l'innovation sont des facteurs clés dans la réussite de ces méthodes chimiques.

À LA POURSUITE DES FABRICANTS DE DROGUE : LE PROFILAGE

En France, il y a en circulation quatre principales familles de stupéfiants :
– le cannabis, drogue d'origine naturelle ;
– la cocaïne, également d'origine naturelle ;
– l'héroïne, d'origine semi-synthétique ;
– l'amphétamine et ses dérivés, drogues de synthèse.

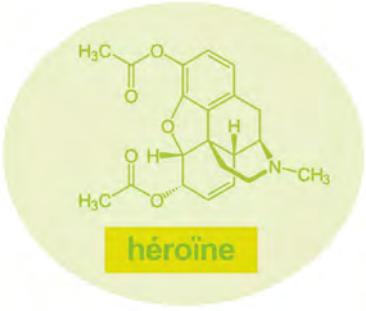


Figure 1
Formule chimique de l'héroïne.

De la production au trafic : un long chemin

La production a en général lieu là où la matière première peut aisément être produite. Les quantités générées sont de l'ordre de la tonne ou de dizaines de tonnes, ce qui représente un marché de gros.

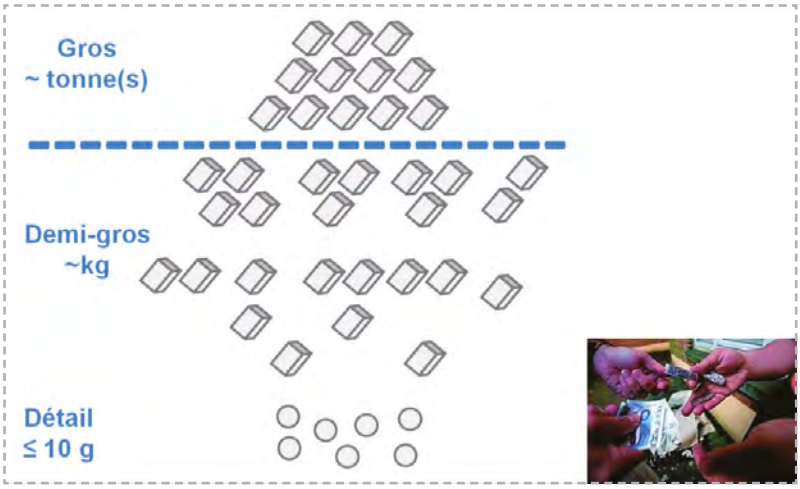


Figure 2

Chaîne d'un trafic international : de la production au dealer de la rue…

La fabrication initiale est alors séparée en plusieurs lots plus petits pour arriver à une échelle de demi-gros de l'ordre de la dizaine ou centaine de kilogrammes, plus faciles à transporter et à dissimuler.

Ces lots sont encore divisés en quantité de l'ordre de la dizaine de grammes pour arriver au niveau de la rue et du marché de détail.

Comment la chimie peut tracer l'ensemble ?

Chaque unité de production où qu'elle soit, a sa propre méthode de collecte de plantes d'intérêt pour produire localement du cannabis, cocaïne, morphine…

L'extraction, la purification et le conditionnement dépendent de pratiques qui sont différentes d'un endroit à l'autre ou d'un continent/pays à l'autre.

La chimie tire profit de cette différence pour rechercher, grâce à son savoir-faire analytique, les lots qui comportent les mêmes impuretés.

Ainsi les impuretés présentes dans les différents lots deviennent les empreintes digitales de la drogue en circulation.

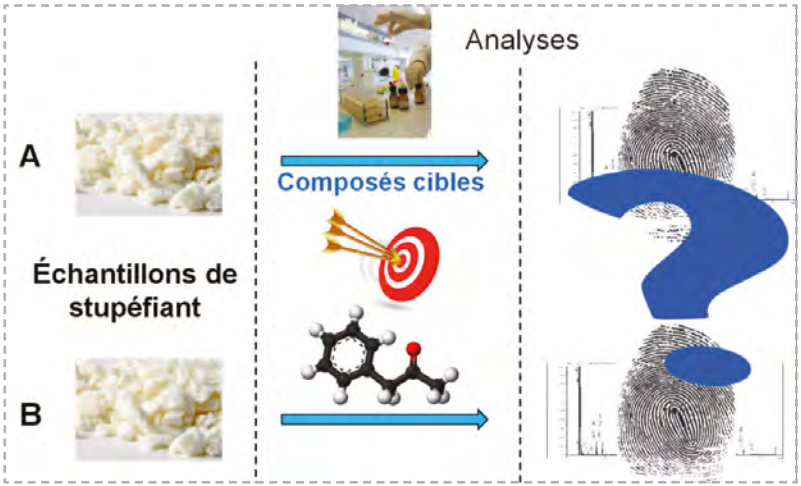


Figure 3

Principe du profilage : on compare des « empreintes chimiques » comme des empreintes digitales !

Les chimistes disposent de plusieurs méthodologies analytiques pour déterminer des traces d'impuretés telles que la chromatographie en phase liquide ou gazeuse, la spectroscopie de masse, la RMN…

Jeu de piste

Des policiers en civil suivent deux jeunes individus qui isolés dans un coin, gare de Saint-Lazare à Paris, sont en train d'échanger des enveloppes de façon suspecte : l'échange a lieu après que le receveur ait reniflé le contenu…

Les policiers interviennent rapidement et confisquent les enveloppes échangées.

Retour au commissariat pour constater qu'une des enveloppes contient environ 10 grammes d'une poudre blanche et l'autre des centaines d'euros en billets.

Des échantillons de cette poudre sont ensuite envoyés au laboratoire d'analyses chimiques.

Le résultat est sans appel : il s'agit de cocaïne sous forme de poudre blanche de son sel de chlorhydrate.

Le chromatogramme du lot révèle de nombreuses empreintes.

Des solvants tels que l'acétone, l'éther éthylique, le cyclohexane ou le toluène sont présents de façon prépondérante et donnent ainsi « l'empreinte » du lot analysé.

L'empreinte est faite.

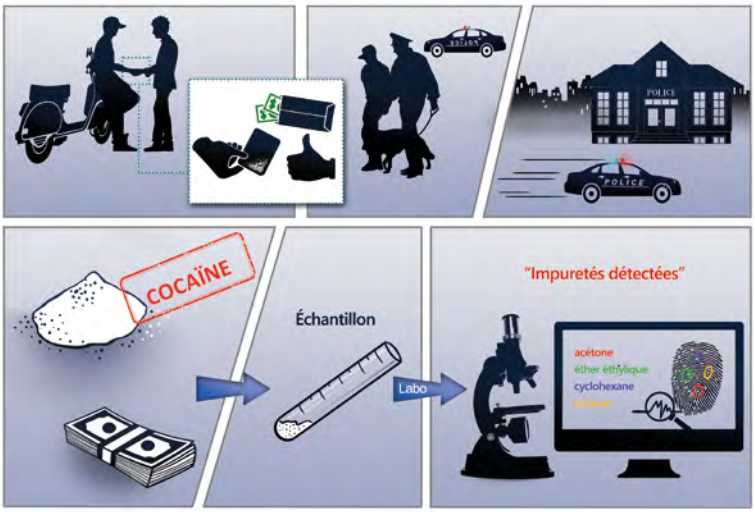


Figure 4

Du dealer à l'analyse chimique dans les laboratoires de la police.

Cette empreinte, désormais digitale du lot de cocaïne, est alors envoyée électroniquement à tous les centres de police internationaux. Les réponses ne tardent pas à arriver :

– **Belgique :** un centre de police reconnaît avoir en sa possession la même empreinte d'un lot de quelques kilos saisi la semaine dernière à Bruges ;

– **Hollande :** un centre de police reconnaît aussi avoir saisi plusieurs centaines de kilogrammes du même lot au port d'Amsterdam sur un bateau en provenance d'Amérique du Sud.

… En continuant ainsi, on arrive à identifier un laboratoire clandestin en plein air, au milieu de la forêt amazonienne.

Le ***chromatogramme :*** c'est un diagramme résultant d'une chromatographie, c'est-à-dire une analyse des constituants chimiques d'un mélange.

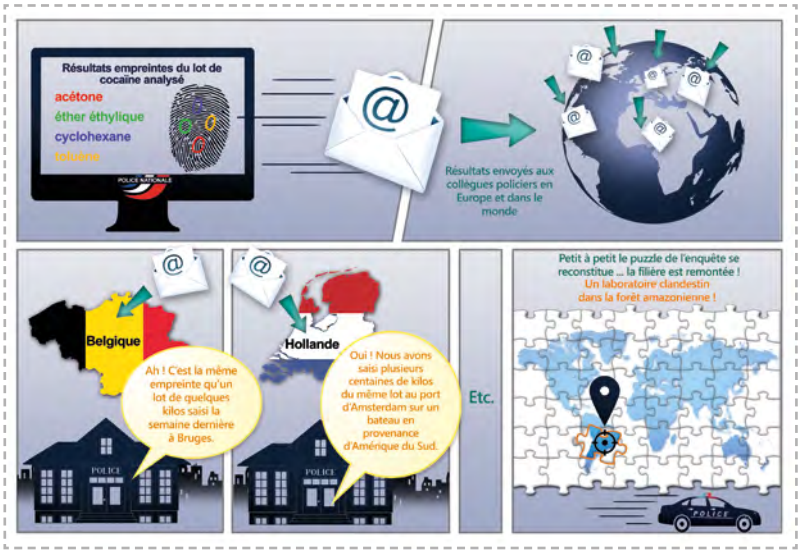


Figure 5

Sur les traces de la cocaïne.

La fabrication de la cocaïne

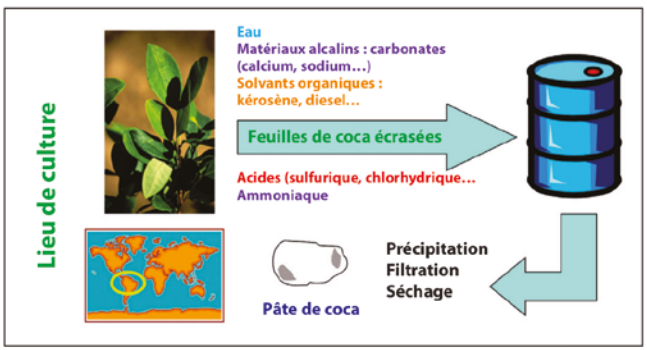


Figure 6

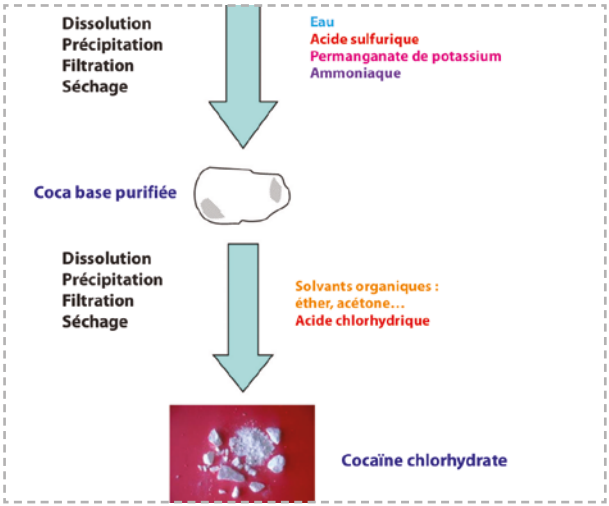
Les différentes étapes de l'extraction de la cocaïne de la feuille de coca.

Le coca pousse abondamment dans les régions humides d'Amérique du Sud. Ses feuilles sont écrasées puis transformées en pâte à l'aide de réactifs chimiques simples et facilement accessibles comme les acides sulfurique ou chlorhydrique.

La pâte de coca obtenue est alors dans un état impur. Elle va subir ensuite de nouvelles étapes de purification grâce à d'autres réactifs et solvants à la portée de tous, pour aboutir à la cocaïne chlorhydrate sous forme de poudre blanche prête à être sniffée, injectée ou fumée.

Figure 7

Étapes de purification de la cocaïne.



Et voilà comment d'une feuille de coca jadis utilisée en infusion par les indigènes des Andes pour maintenir la force et l'énergie nécessaires à la vie, au quotidien, dans des endroits de climat rude, on arrive à un stupéfiant :

– on n'utilise plus la plante mais ce qu'elle contient à l'état pur ;

– on augmente sa production pour plus de consommation ;

– on change de voie d'administration, voie nasale ou pulmonaire plutôt qu'orale, ce qui permet une concentration dans le cerveau très élevée et immédiate.

Ainsi, ce qui était destiné à pallier aux conditions rudes de la vie (grand froid, manque d'oxygène à des hauteurs de plus de deux mille mètres…) est devenu dans nos civilisations sédentaires, le fléau du siècle en termes de consommation et dépendance qui s'en suit.

Conclusion

De nos jours, la chimie et ses procédés d'analyse permettent à la police de remonter aux fabricants de stupéfiants et de démanteler ainsi des réseaux de drogue.

LA LUTTE ANTITERRORISTE

Les mesures utilisées par les terroristes sont classées suivant les initiales NRBCE (Nucléaire, Radiologique, Biologique, Chimique et Explosive). Les risques explosifs sont les plus probables ; ceux par dispersion d'isotopes radioactifs, de toxines ou de virus ou encore l'utilisation d'engins nucléaires bien que – pas totalement nuls – sont tout de même moins probables.

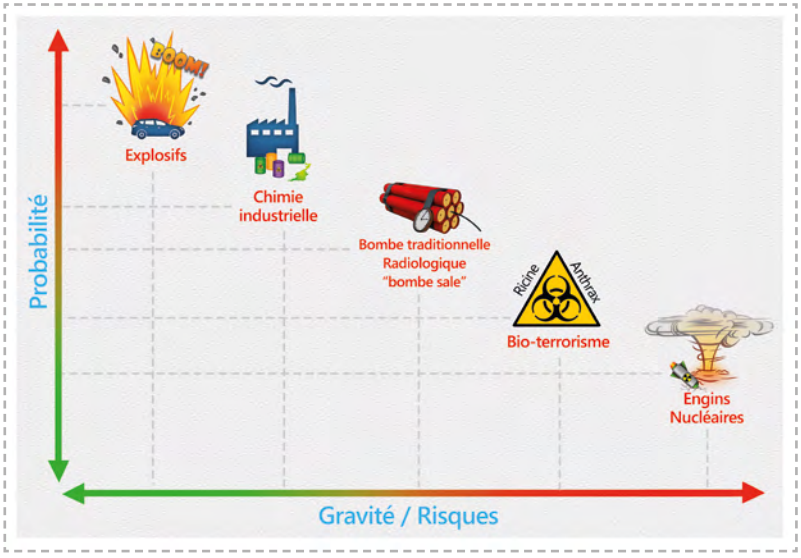


Figure 1

Diagramme de la probabilité d'explosions et de leurs effets.

Les explosifs

Beaucoup d'explosifs ont été découverts et utilisés dans l'Histoire depuis la poudre noire élaborée en 220 avant Jésus-Christ par les Chinois qui ont mélangé du salpêtre (des nitrates) avec du charbon de bois, suivis par les Arabes au VII^{e} siècle , et au XIII^{e} siècle par les Français.

Qu'est-ce qu'un explosif ?

C'est toujours le mélange d'un oxydant qui libère de l'oxygène (O) + un réducteur qui est avide d'oxygène, séparés par un atome neutre comme l'azote (N).

Par exemple pour la poudre noire : $2NO_3K + 2C = 2CO_2 + NOx + K_2O$.

On passe d'un solide à un gros nuage gazeux qui provoque un souffle et une onde de choc : c'est l'explosion.

Les ***composés explosifs*** sont des corps purs qui comportent des groupements oxydants et des groupements réducteurs.

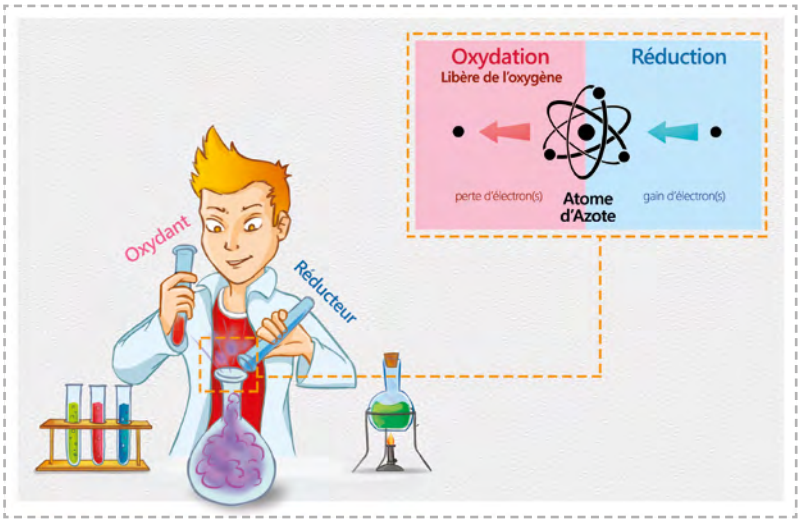


Figure 2

Recette de l'explosif : Oxydant + Atome neutre + Réducteur = Boum !

La nitroglycérine, les nitroaromatiques TNT, les nitramines ou les peroxydes comme le triperoxyde d'acétol (TATP) facile à synthétiser et fréquemment utilisé par les groupes terroristes, sont des explosifs.

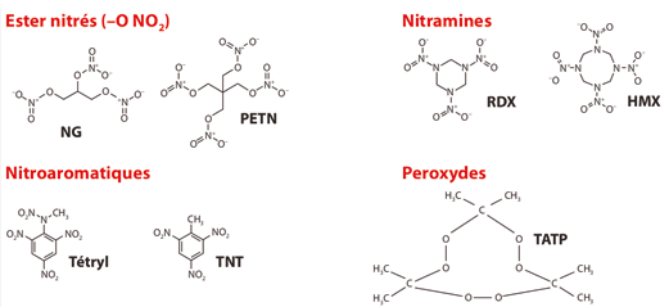


Figure 3

Exemples de molécules explosives.

On distingue les explosifs primaires qui constituent les détonateurs (amorces) car ils explosent facilement (fulminate de mercure) et les explosifs secondaires de moindre sensibilité qui constituent les charges des munitions, des mines ou des bombes.

Comment se décomposent-ils ?

Il existe plusieurs possibilités :

– la combustion à l'air libre et en poudre : l'explosif brûle et se consume à la vitesse de quelques millimètres par seconde ;

– la déflagration : la réaction se déplace dans l'explosif par conduction thermique dans un milieu confiné, le volume et la pression varient et la vitesse de propagation est de l'ordre de quelques centaines de mètres par seconde ;

– la détonation : la vitesse de réaction se déplace par une onde de choc. Il y a une discontinuité, car le volume de gaz chaud est tellement élevé que la vitesse dépasse plusieurs kilomètres par seconde.

Remarque

La vitesse de réaction dans la dynamite est de 6 500 m/s et de 8 000 m/s pour la Pentrite.

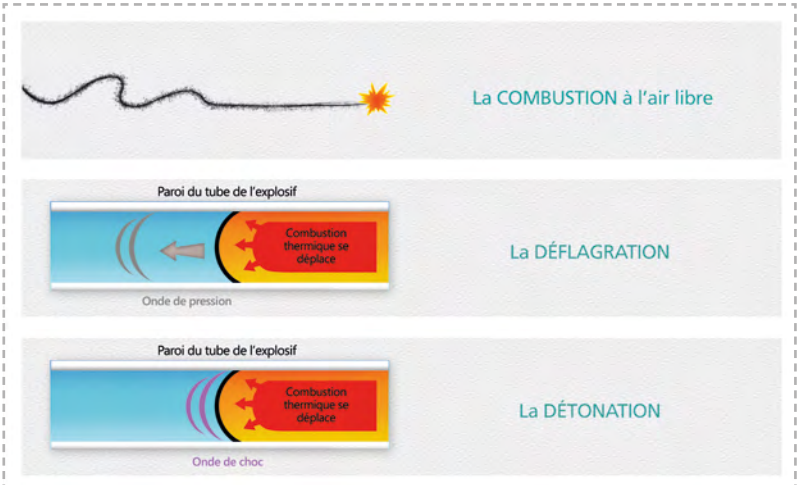


Figure 4

Principes de la décomposition de l'explosif.

Comment se présente un engin explosif ?

Pour commencer, il faut une charge explosive qui peut représenter quelques centaines de grammes jusqu'à plusieurs kilos (cas d'un véhicule piégé).

Un détonateur qui, amorcé par un courant électrique, fera déflagrer la charge explosive.

Une source d'énergie : une pile électrique.

Un système de déclanchement qui activera le courant électrique : une minuterie ou un téléphone portable feront l'affaire.

Le tout doit être dissimulé dans un objet qui n'attire pas l'attention, un sac, une bouteille de gaz…

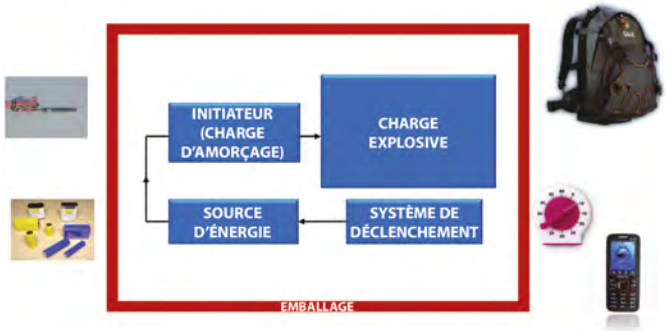


Figure 5

Composants d'un engin explosif dissimulé dans un sac.

Une menace permanente

L'histoire récente montre qu'il y a toujours eu des attentats. Ils ont d'abord visé des chefs d'États : le Premier consul Bonaparte en 1800, Louis-Philippe en 1835, Napoléon III en 1858. Dans l'histoire contemporaine et malgré les moyens de prévention, Paris en 1995 et 2015, Madrid en 2000, Londres en 2005, Oslo en 2011 ont été l'objet d'attentats aveugles qui ont fait des morts et des blessés notamment dans les transports collectifs. Les terroristes font preuve d'invention qu'il faut essayer de déjouer en surveillant mieux les locaux où sont entreposés des explosifs comme les mines ou les dépôts militaires et en étant plus rigoureux sur le contrôle des informations sur Internet.

Figure 6

Peinture de 1862 illustrant l'attentat contre Napoléon III en 1858.

Par ailleurs, les cibles potentielles comme les bâtiments publics, les stades, les transports collectifs nécessitent une surveillance accrue et vigilante par la police et les usagers.

La détection des explosifs

C'est d'abord la pré-détection, les services de renseignement, la police, la gendarmerie, les juges antiterroristes tentent d'arrêter les terroristes avant qu'ils ne passent à l'acte. C'est heureusement ce travail de l'ombre qui permet d'éviter de nombreuses catastrophes et de découvrir les caches d'explosifs avant leur utilisation mortelle. Parallèlement à la pré-détection, il faut mettre également en œuvre tout l'arsenal physique et chimique pour prévenir les attentats en répondant à plusieurs défis :

– où est l'explosif ?

– comment protéger les lieux, un bâtiment, un aéroport, un stade ?

– comment se présente le paquet piégé : une valise, une poubelle, un véhicule ?

– est-ce un solide, un liquide, un gel ?

– l'explosif est-il sur une personne, ceinture, chaussure ?

Il faut pouvoir répondre rapidement à toutes ces questions par la méthode la plus appropriée possible.

Les détecteurs

Ils sont classés en deux catégories :

– les détecteurs actifs (*Figure 7A*) : ils émettent une onde électromagnétique (comme un radar) vers la personne ou l'objet à contrôler. Soit l'onde traverse et le signal est récupéré sur un écran (comme une radio chez le médecin), soit elle est réfléchie et un capteur analyse la réponse ;

– les détecteurs passifs (*Figure 7B*) : ils sont applicables sur l'homme, c'est par exemple l'aspiration de vapeurs, frottis sur les mains ou prélèvements sur les vêtements qui sont analysés ; le temps de mesure est plus long.

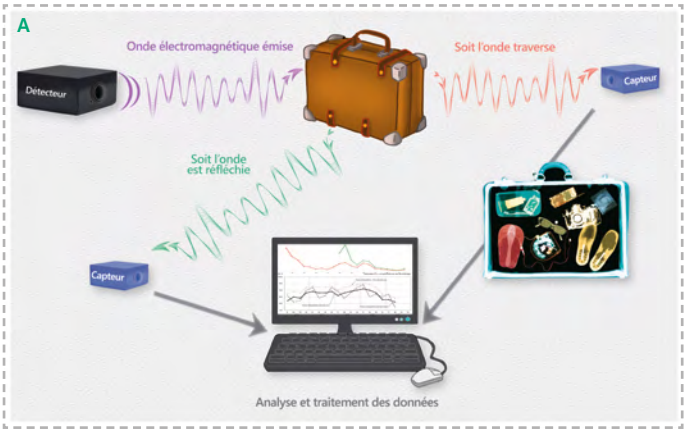
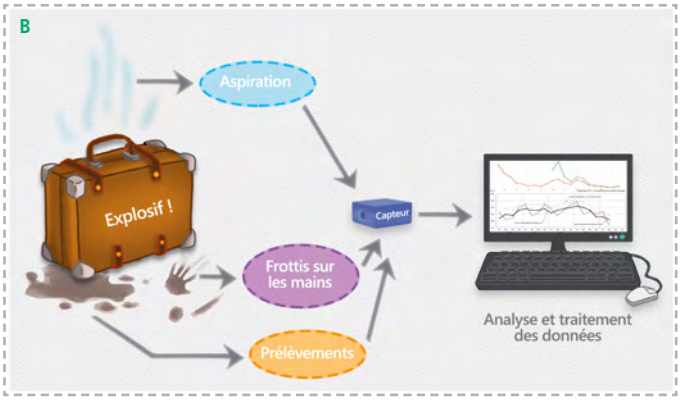


Figure 7

A) Détecteur actif ;
B) détecteur passif.



Les détecteurs actifs

Les rayonnements utilisés correspondent à toute la gamme de fréquences des ondes électromagnétiques.

• Le détecteur à rayons X

Le principe est le même que celui employé en radiologie médicale.

En effet, les rayons X sont utilisés par les radiologues pour voir si un os est cassé ou pour contrôler les poumons par une radiographie. Ils traversent les corps et les objets et renvoient sur un écran des images d'objets ou d'os plus ou moins sombres suivant leur composition.

Dans les aéroports, des agents spécialisés utilisent ces détecteurs pour contrôler les bagages. Ils interprètent en temps réel, sur écran,

la composition de la valise soumise au rayonnement. Des essais sur les passagers ont été faits dans certains aéroports américains mais vite retirés suite à des plaintes pour atteinte à la vie privée.

- **Le détecteur à rayonnement neutronique**

Les neutrons sont émis par des isotopes. Canalisés, ils sont émis et par diffusion élastique, ils sont réémis en fonction de la densité de l'obstacle qu'ils rencontrent. Ils sont surtout employés pour contrôler de grands objets comme les conteneurs maritimes.

- **Le détecteur à infrarouge**

Les ondes à infrarouge sont très utilisées dans la vie courante pour verrouiller ou déverrouiller une portière, pour allumer un appareil de télévision et changer les chaînes. C'est une technologie à longue distance (plusieurs mètres) et grande surface pour explorer, par exemple, un véhicule (voiture, camion…).

L'ingénierie infrarouge peut aussi, avec certaines fréquences caractéristiques, détecter une molécule explosive donc l'engin explosif mais aussi localiser des traces sur un individu.

- **Le détecteur à ondes Terahertz**

La fréquence des ondes est comprise entre 500 et 5 000 GHz. Cette technique permet de détecter, par imagerie, des objets cachés sous les vêtements.

- **Le détecteur à ondes millimétriques**

Il s'agit de la même technologie utilisée dans les radars installés sur les routes pour mesurer la vitesse des véhicules. On l'emploie dans les portiques dits « body scanners », le détecteur donne une image du corps sous les vêtements et permet donc d'identifier les objets cachés. Il pose évidemment des problèmes d'éthique.

- **Le détecteur à micro-ondes**

La fréquence des ondes utilisées est inférieure à 100 GHz ; on s'en sert au quotidien dans la cuisine avec les fours à micro-ondes. Ici, les fréquences sont plus élevées et utilisées non en absorption mais en réflexion, il s'agit de la reconnaissance de forme.

• Le détecteur à radio fréquence

Ce type de détecteur permet notamment d'identifier les atomes d'azote par résonance. Comme la plupart des explosifs se composent de molécules comprenant de l'azote, ces dernières sont décelées par leur spectre et on le couple aussi à l'Imagerie par Résonance Moléculaire. Ce dispositif est encore à l'état de prototype.

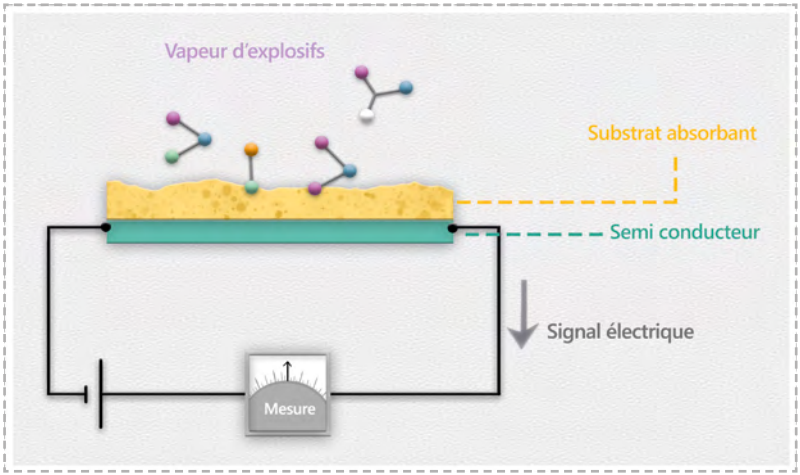
Les détecteurs exigent presque tous un poste particulier et des opérateurs spécialisés, un portique et parfois la palpation individuelle complémentaire. C'est donc un investissement non négligeable adapté à des contrôles d'individus ou de véhicules ou de bagages, les plus connus étant les détecteurs à rayons X dans les aéroports. Leur généralisation aux gares SNCF n'est pas sans poser de problèmes.

Les détecteurs passifs

Ces détecteurs permettent d'analyser des vapeurs. Qu'est-ce qu'une pression de vapeur ? On connaît bien la vapeur blanche qui s'élève d'une casserole d'eau qui bout sur le feu. En effet, à 100 °C, la pression de vapeur de l'eau est égale à l'atmosphère et toute l'eau s'évapore. À température ambiante, la pression de vapeur de l'eau est bien plus faible mais elle existe. Pour un autre liquide et même un solide, il y a toujours une pression de vapeur que l'on peut déceler avec un système sensible. Les explosifs ont des pressions de vapeur comprises entre 10^{-3} (1 pour 1 000) et 10^{-15}. Pour savoir les détecter, on dispose

Figure 8

Analyse des vapeurs.



de détecteurs jusqu'au ppb (une partie par milliard), en dessous de cette concentration, c'est très difficile en raison des interférents potentiels présents dans l'air.

• Le détecteur biologique

Le chien est un excellent détecteur biologique de par son odorat très développé. On l'entraîne par apprentissage à mémoriser des odeurs particulières. Son emploi a largement fait ses preuves, il nécessite un personnel spécialisé présent sur place.

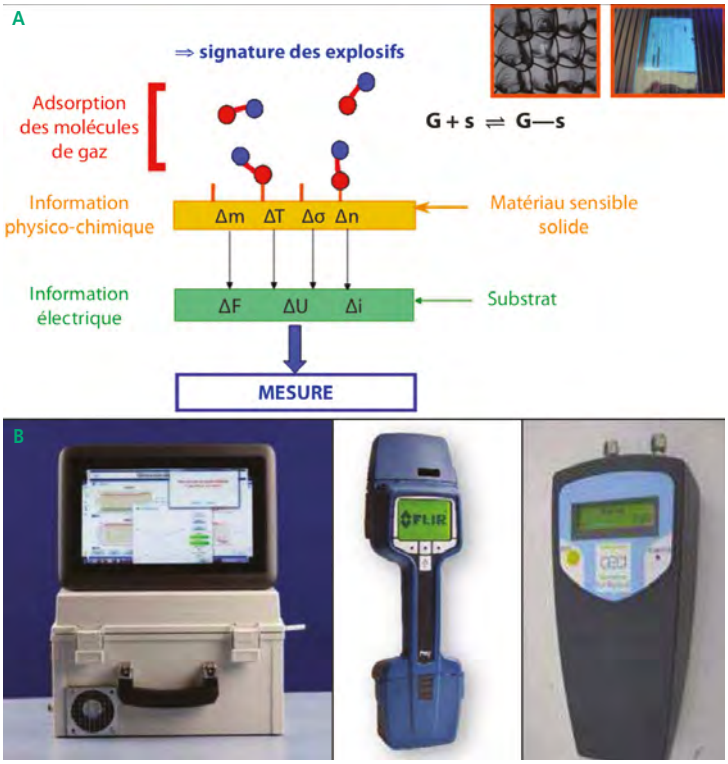
Figure 9
Le chien renifleur.

• Les détecteurs chimiques

Il s'agit de faire aussi bien que l'odorat d'un chien. On imagine des couches minces sur substrat de matériaux qui absorbent les molécules de vapeur et provoquent soit une variation de poids détectée par une micro-balance à quartz, soit une différence de résistance électrique détectée par un micro-voltmètre, soit une variation de fluorescence détectée par une cellule photovoltaïque. Ces dispositifs bénéficient de la miniaturisation électronique et de la microélectronique, ce qui permet la fabrication d'appareils portables. Leur temps de réponse de plusieurs secondes limite parfois leur utilisation.

Figure 10

Détecteurs chimiques :
A) principe de mesure ;
B) quelques exemples de transducteurs.



La recherche

Actuellement, plusieurs pistes sont développées. En pré-détection, des caméras équipées de logiciels d'analyse d'image pouvant déceler les comportements anormaux des individus sont en cours d'installation. Par ailleurs, on essaye d'élargir le spectre des molécules pouvant être détectées, on améliore la sensibilité des capteurs.

Le couplage de plusieurs techniques de détection croisées, comme les micro-ondes, l'infrarouge et les détecteurs chimiques est mis en œuvre. Il permet de confirmer la présence effective d'un objet ou d'individu dangereux en éliminant le risque d'une fausse alerte.

Les analyses post-attentats

Petite histoire d'une explosion…

BOUM !

Un bruit assourdissant résonne dans la maison, les vitres tremblent et au coin de la rue une fumée s'élève et bientôt les lueurs d'un incendie sont visibles.

Une voiture en flamme, les « pimpon» des pompiers qui dès leur arrivée brisent les vitres de la voiture et éteignent l'incendie.

Partout des débris et des morceaux de vitres brisées et des véhicules endommagés.

Les pompiers et la police s'aperçoivent qu'il y a un cratère dans la chaussée et que c'est un engin explosif qui a sauté et non la voiture maintenant calcinée.

Vite, la police établit un périmètre et des équipes en noir de démineurs effectuent une visite de sécurité tout autour pour vérifier qu'il n'y a pas un second engin dangereux dans le voisinage.

Des hommes en blanc avec une capuche, un masque sur la bouche comme un chirurgien et des gants regardent partout même sous les voitures, et ramassent précautionneusement les objets qui ont été projetés alentour, et les mettent dans des sacs en plastique.

Un policier du quartier garde le périmètre et a pu déjà récupérer un sac déchiré, un bouton d'une minuterie et une pile électrique.

Ces objets vont « pouvoir parler » !

Figure 11

Scénario d'une explosion.

Conclusion

L'explosif n'est pas un produit nouveau pour l'homme. Depuis déjà des siècles, il a su faire des mélanges détonants et avec le temps bien sûr, de plus en plus performants. Il a donc fallu, en parallèle, développer et affiner des moyens de détection pour déjouer les plans des terroristes. De nos jours, l'histoire nous montre qu'il faut redoubler de vigilance et la recherche va dans ce sens.

FAUX : VOUS ÊTES SÛRS ?
LA VIE DES ŒUVRES D'ART

Pourquoi frauder sur les œuvres d'art ? Parce qu'elles sont belles, certes, mais aussi parce qu'elles sont authentiques et qu'elles valent cher.

Authentique signifie que l'on connaît son auteur (comme un tableau, une sculpture) ou ses origines (comme une grotte préhistorique, un château, une fresque etc.). Le prix de l'œuvre, bien entendu, est d'autant plus élevé que l'auteur est célèbre ou l'origine exceptionnelle.

Figure 1

La tête en verre bleu d'Égypte.

Puisque ça vaut cher, des gens malhonnêtes vont vouloir en profiter. Ils fabriquent des copies ou des œuvres semblables et mentent sur leur origine. Regardez cette tête en verre bleu (*Figure 1*) qui proviendrait soi-disant du tombeau de Toutankhamon mais qui vient en fait de l'atelier d'à côté !

Comment démasquer les fraudeurs ?

La première méthode pour démasquer les fraudeurs est de faire appel à un spécialiste des styles des œuvres.

Mais les faussaires peuvent être extrêmement habiles, copier ou imiter à la perfection. Et les experts ne sont pas infaillibles et peuvent se laisser tromper. L'exemple des « faux Vermeer » peints par Han van Meegeren au début du XX^{e} siècle en donne un célèbre exemple (voir encart « L'affaire des faux Vermeer »).

Un ***spécialiste des styles des œuvres*** sait reconnaître les origines des œuvres en les examinant, connaît tout le travail de tel ou tel artiste durant sa vie et regarde si c'est compatible avec l'œuvre présentée, etc. Il décèle les anomalies et démasque les menteurs – que l'on appelle les faussaires.

L'affaire des faux Vermeer

Han van Meegeren (1889-1947) est un faussaire hollandais qui a fabriqué au début du XX^{e} siècle, des faux tableaux de Vermeer (peintre du XVII^{e} siècle ; 1632-1675) comme « Les Pèlerins d'Emmaüs » représenté sur la *figure 2*. Il avait vendu un autre tableau « de Vermeer » au général nazi Göring pendant la Seconde Guerre mondiale et après la Libération, il a été accusé de haute trahison pour cette vente d'un chef-d'œuvre d'État.

Sur le point d'être condamné, Van Meegeren a avoué sa tromperie et pour la prouver a même dû réaliser un tableau de Vermeer devant la justice et la police.

Ce n'est que plus tard, grâce aux analyses scientifiques que l'on a vu que Van Meegeren avait rajouté une résine sur la sculpture pour accélérer son séchage – sinon, Göring ne se serait pas laisser tromper. On a aussi découvert, parmi les composants de la tête, des traces de bleu de cobalt qui n'a été inventé que 150 années après Vermeer (par Louis-Jacques Thénard).

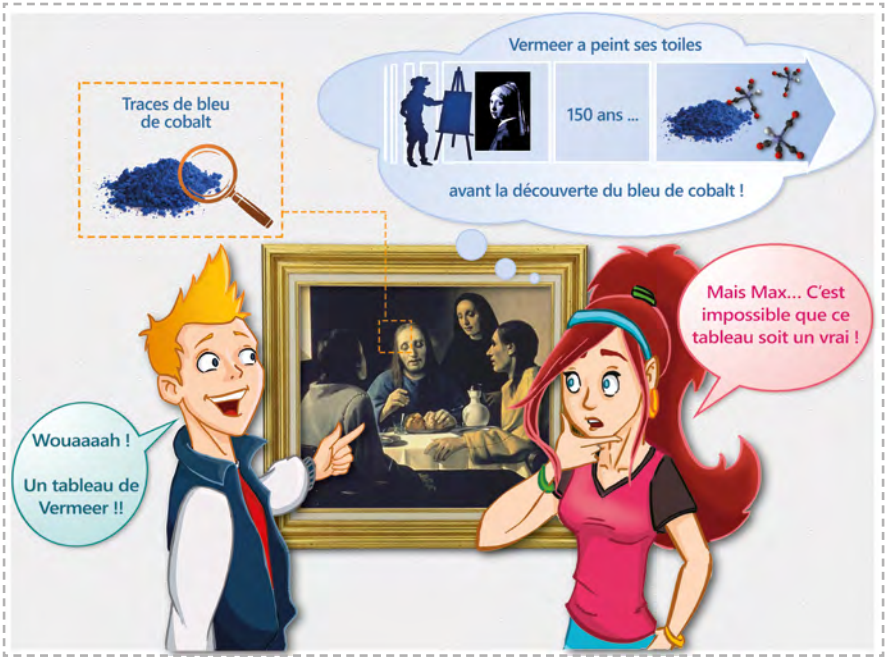


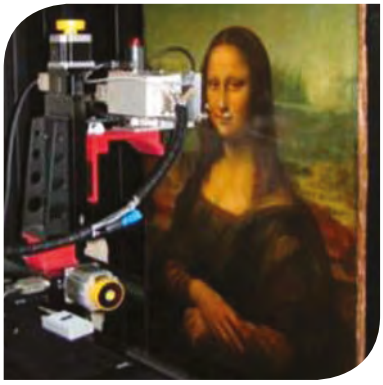
Figure 2

Faux tableau de Vermeer, Les Pèlerins d'Emmaüs (1937).

Pour obtenir des preuves, on fait appel alors à des analyses scientifiques. Un objet d'art ou un objet archéologique, c'est d'abord un objet constitué de matériaux. On peut l'examiner avec les instruments et les méthodes mises au point dans les laboratoires.

La *figure 3A* montre ainsi « notre » tête bleue égyptienne (voir paragraphe précédent) soumise à un examen d'analyse chimique ; la *figure 3B* montre que même la Joconde, l'un des plus célèbres tableaux de l'histoire, a également été soumis aux analyses d'authentification.

A



B

Figure 3

A) La « Tête en verre bleu d'Égypte » soumise à une analyse par la méthode PIXE ; **B)** Examen de la Joconde, de Léonard de Vinci au musée du Louvre.

Pour toutes ces analyses, ce sont les chimistes et les physiciens qui étudient tout un ensemble de caractéristiques : la couleur de l'objet (les pigments), la présence d'impuretés chimiques (qui traduisent l'origine des matériaux), les évolutions dues au vieillissement de l'œuvre etc.

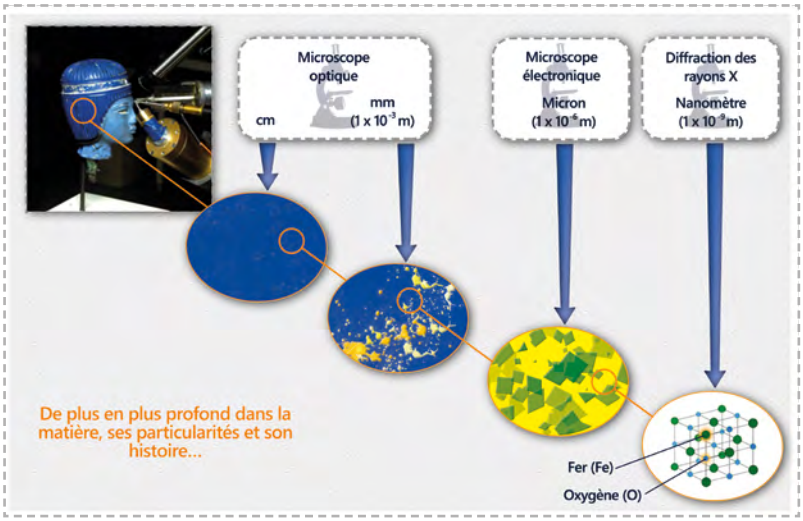
Souvent, il va être possible de dater l'objet analysé : si la matière qui le compose n'est pas identique à celle de l'époque prétendue, l'objet sera forcément un faux.

Remarque

Ces analyses ont permis de montrer que des objets ont été fabriqués par un procédé inventé beaucoup plus tard que la date supposée d'origine de l'objet.

Figure 4

Une analyse de plus en plus poussée de la matière pour traquer les faux.



L'histoire de la tête en verre bleu d'Égypte

Cette statuette en verre était considérée jusqu'aux années 1990 comme provenant du tombeau de Toutankhamon, (pharaon égyptien des années 1500 avant Jésus-Christ) découvert au début du XX^{e} siècle.

Les analyses scientifiques ultérieures ont montré que le verre bleu de cette statuette ne contenait aucun pigment d'origine végétale. Il ne peut donc être égyptien puisque ceux-ci fabriquaient leurs pigments à partir des plantes : il s'agit donc d'un faux !

Il reste cependant vrai que cette statue représente la tête du jeune Toutankhamon, telle que découverte à nos yeux au tout début des années 1920. En fait, l'objet avait été acheté à un marchand par le musée du Louvre deux ou trois années après la découverte de la tombe de Toutankhamon.

Le faussaire avait copié le style de l'Égypte ancienne et réalisé une œuvre qui a fasciné les amateurs du monde entier. Le Louvre n'ayant pas d'informations précises sur son origine géographique et ne comprenant pas bien d'où il venait, a voulu remettre en cause l'authenticité possible de cette œuvre… heureuse méfiance !

Expert en art et expert scientifique unis pour la vérité

Les méthodes scientifiques d'analyse des œuvres d'art peuvent révéler un faux, toutefois elles ne peuvent pas affirmer une origine authentique. Les experts en art sont évidemment ceux qui ont le dernier mot, mais la science est là pour soutenir leur jugement. Une collaboration est nécessaire, car l'expert n'est pas infaillible.

En 1994, les époux Beltracchi ont annoncé qu'ils avaient l'autorisation de diffuser l'une des collections de tableaux les plus riches au monde : œuvres modernes de Pechstein, Braque, Derain, Max Ernst, Dufy, etc. Des conservateurs et des experts renommés ont fourni des certificats d'authentification en se fondant sur les analyses des styles. De très nombreux acheteurs et maisons de vente aux enchères se sont précipités sur cette aubaine. En 2006 seulement, un acheteur méfiant demande une expertise scientifique et… tout l'édifice s'effondre.

La collection Jägers est une fiction : toutes les œuvres sont des faux. Ce n'est qu'en 2010 que les contrefacteurs seront arrêtés. Cette aventure extraordinaire (c'est la plus grande escroquerie de tableaux de tous les temps) montre que **les experts en art ne peuvent ignorer les experts scientifiques.**

Trahison par la couleur

La couleur est une des propriétés essentielles des objets d'art qui est choisie par l'artiste. La *figure 5* illustre la variété des couleurs.

Le ***pigment*** désigne le composant coloré de la peinture.

Figure 5

La variété des pigments dont disposent les artistes et les artisans.

Regardons de plus près l'histoire du pigment bleu outremer.

Figure 6

Lapis-lazuli venant de Sar-e-Sang en Afghanistan.

Autrefois, la couleur bleu foncé provenait d'une pierre naturelle dénommée lapis-lazuli. On ne la trouvait que dans des pays lointains (comme l'Afghanistan), ce qui a donné le nom de « bleu outremer » (au-delà des mers) au colorant que l'on en tirait. Mais trouver cette pierre et extraire le colorant coûtait horriblement cher. Un concours pour trouver des substituts artificiels a été organisé au début du XIX^{e} siècle en France. C'est le chimiste Jean-Baptiste Guimet qui l'a remporté en 1828.

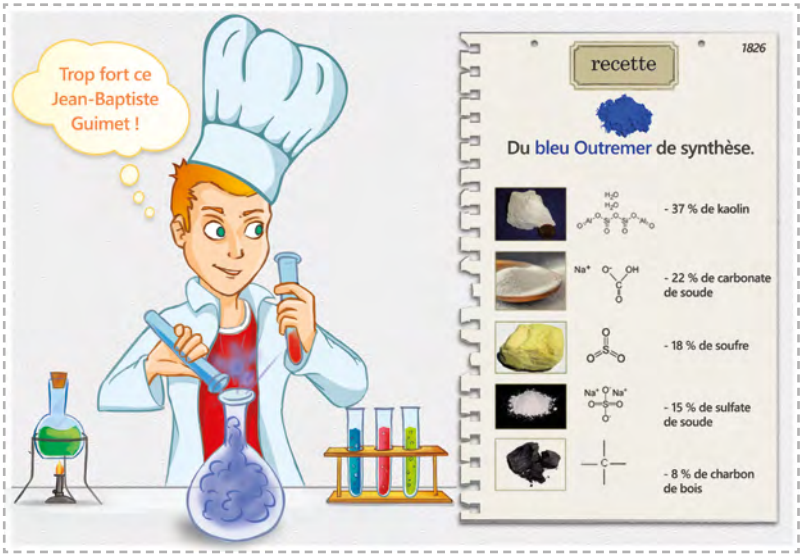
Figure 7

Jean-Baptiste Guimet s'est vu remettre de nombreux prix pour sa synthèse artificielle du lapis-lazuli, origine du « bleu outremer ».

Un gros travail d'analyse chimique d'échantillons de lapis-lazuli par les méthodes de l'époque a permis à Guimet de découvrir la composition du cristal et à en réaliser la synthèse. La formule chimique est très complexe : elle contient des ions silicates, aluminium, sodium, des ions sulfates, des ions chlore (*Figure 8*), mais J.-B. Guimet a

Figure 8

La composition chimique du lapis-lazuli.



réussi à la reconstituer synthétiquement en laboratoire. L'origine physique de sa couleur est restée mystérieuse jusqu'aux années 1970 ; où elle a été attribuée à la présence des édifices soufrés dans la structure chimique.

Figure 9

« L'Église d'Auvers-sur-Oise », tableau de Van Gogh. À son propos, il écrivait : « *… le bâtiment paraît violacé contre un ciel d'un bleu profond et simple de cobalt pur, les fenêtres à vitraux paraissent comme des taches bleu d'outremer, le toit est violet et en partie orangé… la couleur est probablement plus expressive, plus somptueuse* ».

De nouveaux pigments bleu (bleu de Prusse, bleu de cobalt…) ont été inventés à différentes époques grâce aux recherches en chimie stimulées par les artistes et les artisans qui veulent toujours mieux et plus. On voit, par exemple, l'enthousiasme de Van Gogh à propos de son tableau « L'Église d'Auvers-sur-Oise » (*Figure 9*). Le pigment utilisé trahit l'époque à laquelle l'œuvre a été faite et permet d'identifier les éventuels « faux ».

Les pigments bleus ne sont pas les seuls à avoir progressé au moyen de la chimie. Cela a été vrai pour tous les pigments. Le pigment blanc, pour donner un autre exemple, a toujours été important en peinture, en effet, les peintres recherchent une matière éclatante qui puisse dominer les couleurs qu'elle recouvre (*Figure 10*).

Figure 10

Pierrot par Watteau.

On a pu en fabriquer à partir du plomb, du zinc, du titane… L'analyse du pigment blanc des peintures fournit une méthode de détection de fraudes efficace. Si l'on détecte du titane dans une œuvre, par exemple, celle-ci ne peut dater d'avant 1918.

L'identification de la structure du pigment renseigne sur l'époque de son utilisation et donc sur la datation l'œuvre.

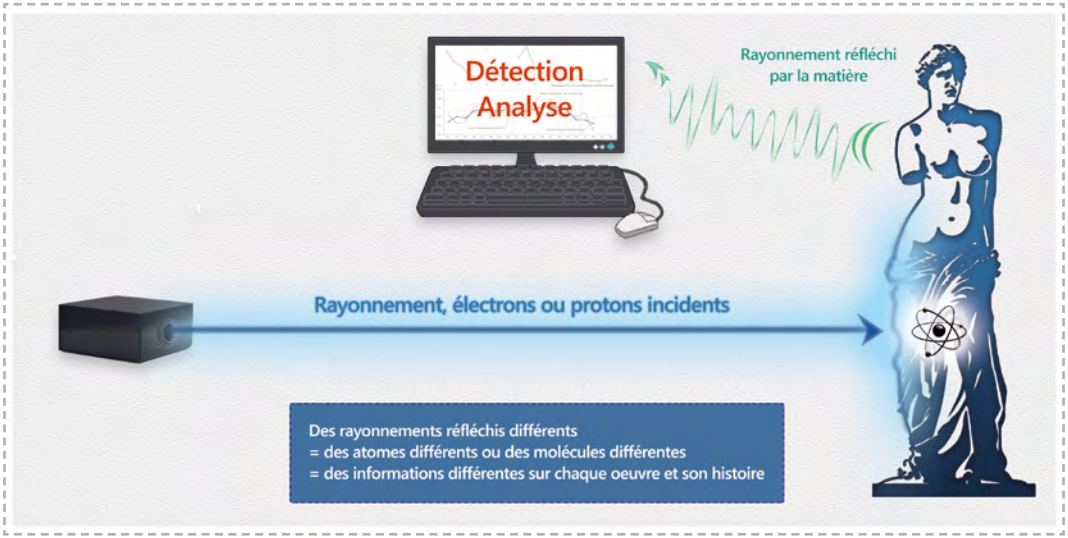
Les méthodes de l'analyse chimique

Quand on envoie un rayonnement sur un objet, ce dernier modifie le rayonnement. Par exemple, vous recevez des rayons X sur la poitrine, ils vont refléter une image que le médecin interprète, il peut ainsi voir l'état des poumons ; si vous diffusez une lumière bleu dans une salle de spectacle, tous les vêtements blancs ressortent de façon éclatante. Et il y a beaucoup d'autres exemples.

À l'échelle des molécules et des atomes et avec les moyens des laboratoires, on s'aperçoit que ces propriétés sont générales : si l'on envoie un rayonnement sur un échantillon, il en ressort un autre rayonnement. Celui-ci donne beaucoup de renseignements car chaque espèce d'atome ou de molécule émet des rayonnements différents. Ce qui est émis par un atome de titane n'est pas la même chose que ce qui est émis par un atome de plomb.

Figure 11

Principe de l'analyse chimique par rayonnement.



C'est cette propriété qui est à la base des méthodes d'analyses chimiques aujourd'hui les plus employées : elles permettent de vérifier la présence ou l'absence d'un élément chimique recherché et de donner éventuellement sa quantité. Le *tableau 1* ci-dessous (il est loin d'être complet et déjà assez compliqué comme cela !) liste quelques méthodes d'analyse qui utilisent les rayonnements.

Ces méthodes ont toutes un grand avantage : leur sensibilité. Elles permettent d'obtenir des résultats sur des quantités infimes d'échantillon. On les appelle des « méthodes » non destructives, car elles ne nécessitent pas, comme les méthodes anciennes, de prélever une partie de l'objet d'art pour en faire l'analyse : leur emploi ne détériore ainsi pas l'objet.

Tableau 1 **Quelques-uns des moyens physico-chimiques utilisés pour l'analyse des œuvres d'art.**

Techniques d'analyse élémentaire	L'analyse chimique peut :
Microscopie électronique. Spectrométrie de fluorescence des rayons X. Spectrométrie d'émission atomique. Analyse par faisceaux d'ions (PIXE).	• voir quels **atomes** sont présents et en quelles quantités ; • identifier les **molécules** présentes et connaître leurs quantités ; • déterminer la présence de **minéraux.**
Techniques d'analyse moléculaire et structurale	
Diffraction des rayons X. Spectrométrie infrarouge.	

Remarque

Les molécules renseignent sur la nature même des objets, les supports par exemple sur lesquels ont été déposées les couches de peinture. Ces molécules vieillissent, évoluent avec le temps et leur étude permet de remonter à l'âge de leur fabrication et à leurs conditions de conservation.

Les atomes qui intéressent l'étude des œuvres d'art sont souvent ceux des impuretés des produits utilisés. Ceux-ci proviennent souvent (mais de moins en moins du fait des développements de la chimie) de la nature, des roches repérées par exemple pour leur qualité pigmentaire.

Mais les roches ne sont jamais pures. Elles contiennent toujours des « impuretés », petites quantités d'éléments étrangers. Par exemple, une roche constituée principalement d'oxyde de fer, contiendra aussi des impuretés d'autres métaux (cuivre, manganèse, aluminium, etc.). La nature de ces impuretés est en quelque sorte une signature de la roche d'origine et donc de la matière première utilisée par l'artiste. Les atomes

Les minéraux sont des arrangements réguliers d'atomes. L'étude des structures présentes décèlera donc leur présence : ce peut être des pigments, des matériaux constitutifs des objets comme des céramiques.

qui sont concernés sont généralement des atomes de métaux. C'est en particulier le cas pour les pigments qui sont à l'origine des couleurs.

Les méthodes d'analyses ne testent pas toujours l'échantillon en son entier, car les rayonnements ne pénètrent pas complètement à l'intérieur des objets. On a alors des méthodes dites de « de surface » qui sont sensibles à l'extérieur des objets et non pas à leur masse. Ceci est très important pour étudier les couches superficielles (colorants, films protecteurs) apportées aux objets pendant leur fabrication et qui constituent leur décoration ou leur conditionnement – c'est-à-dire ce qui fait l'apparence de l'objet.

C'est ce que réalisent parfaitement les méthodes utilisant des faisceaux de particules comme la méthode dite PIXE (*Proton Induced X-Ray Emission*) que nous avons vue à l'œuvre sur la tête en verre bleu. (voir encart « La méthode PIXE expliquée par le schéma de l'atome »).

Les phénomènes physiques mis en jeu sont nombreux et complexes. On n'en donnera pas ici des explications approfondies sauf dans l'encart « Quelle lumière un atome peut-il émettre ? » qui explicite le principe des méthodes d'analyse par fluorescence.

La méthode PIXE expliquée par le schéma de l'atome

Un atome est d'une dimension infime (on peut l'assimiler à une sphère d'environ un dixième de nanomètre de diamètre) et néanmoins complexe : il est constitué d'un noyau et d'électrons dont l'arrangement fait penser à un petit système solaire. Les électrons occupent des « couches » discrètes que l'on appelle couche K pour la plus proche du noyau, L pour la suivante, puis M etc.

Un rayon de lumière ou un faisceau de particules qui impacte l'atome excite des électrons de couches inférieures à des couches supérieures. Lorsque l'atome excité revient à son état fondamental, les électrons préalablement excités regagnent des couches inférieures en émettant des rayons de lumière caractéristique de l'atome.

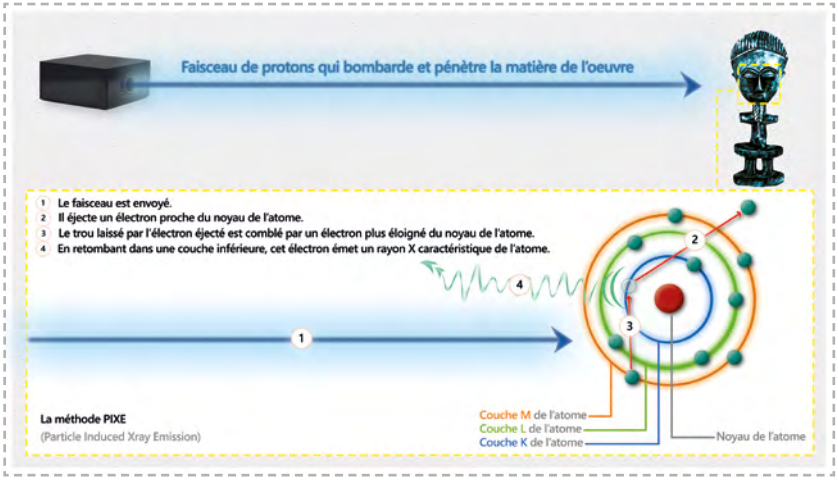


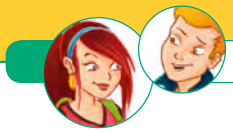
Figure 12

Principe de la méthode PIXE.

Lorsque le matériau est bombardé par un faisceau de protons, tous ses atomes sont perturbés :
1 - des électrons sont excités ;
2 - puis ils retournent à leur état fondamental, mais…
3 - …ce retour s'accompagne de l'émission de rayons, en particulier de rayons X.

Il reste alors à détecter ces rayons X pour caractériser la composition de l'échantillon : c'est la méthode dite PIXE (*Proton Induced X-ray Emission*).

Sa mise en œuvre demande un équipement lourd, un canon à protons (ou à autres particules lourdes). Le laboratoire du musée du Louvre dispose d'un tel équipement, l'accélérateur AGLAE qui travaille pour de nombreux musées français et étrangers.



Quelle lumière un atome peut-il émettre ? Le principe des méthodes d'analyse par fluorescence

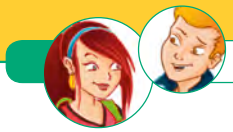
Le principe est le même que pour la méthode PIXE.

Les rayonnements émis caractérisent l'élément émetteur. Lorsqu'un échantillon (par exemple la surface d'un tableau) est perturbé par une excitation extérieure, beaucoup d'atomes vont émettre des rayonnements, chacun constitué de ses composantes caractéristiques. En regardant de près ces rayonnements, on va pouvoir remonter à la nature des atomes qui les ont émis et déceler la présence des atomes correspondants. On va même pouvoir faire un pas de plus car l'intensité des rayonnements émis par un ensemble d'atomes correspondants est proportionnelle à leur nombre : on détermine ainsi la proportion des « impuretés » dans l'échantillon, caractéristique de l'origine de celui-ci.

Ce phénomène de réémission de rayonnement après excitation porte le nom de « fluorescence » et les méthodes qui consistent à analyser ces rayonnements sont les spectroscopies de fluorescence. Elles existent dans le domaine des rayonnements lumineux (infrarouge, visibles ou ultra-violets), dans celui des rayons X ou encore sous excitation par des faisceaux de particules comme dans la méthode PIXE (voir encart).

Conclusion

Grâce à la chimie et à ses techniques d'analyse de plus en plus poussées, les fraudes dans le domaine de l'art sont de plus en plus difficiles à réaliser et se dévoilent au grand jour.



POUR UNE INDUSTRIE CHIMIQUE PROPRE ET DURABLE

Beaucoup de gens pensent que « si c'est chimique, ce n'est pas naturel » alors qu'en réalité, la chimie est partout !

De même, on associe souvent les deux mots « chimie » et « danger », mais ce qui compte c'est de connaître le risque pour maîtriser le danger. Le risque, c'est la probabilité que des effets néfastes puissent être engendrés par une substance dans des circonstances précises.

Dans la plupart des accidents, certes le produit lui-même était dangereux mais **le risque a été augmenté par des erreurs humaines** au niveau de l'entreprise.

La chimie peut être source de **risques diffus ou chroniques** dus à la pollution de l'atmosphère et de l'environnement, mais en même temps, c'est la chimie qui permet de trouver des solutions pour éliminer cette pollution.

Des listes de substances chimiques dangereuses ont été établies, une très courte sélection des plus connues est donnée dans l'encart « Des substances chimiques connues pour leur danger ».

Remarque

Historiquement, le risque chimique a souvent été lié à des **explosions accidentelles** d'usine : Sevezo en 1976, Bophal en 1984, AZF en 2001.

Des substances chimiques connues pour leur danger

- Distilbène® (traitement de la ménopause) : cancérigène
- Médiator (traitement du diabète, utilisé comme coupe-faim !) : provoque de l'hypertension pulmonaire
- Bisphénol A (utilisé pour fabriquer des plastiques et résines) : perturbateur endocrinien
- Parabènes (utilisés longtemps comme conservateurs en cosmétique et dans l'industrie pharmaceutique) : certains peuvent être des perturbateurs endocriniens
- Phtalates (utilisés comme additifs pour rendre les plastiques plus souples) : perturbateurs endocriniens pour les plus hydrophobes

Depuis 1985, la responsabilité des industriels dans les éventuels dommages liés aux produits chimiques est encadrée, notamment en Europe, à partir de 2007, par le **règlement REACH** pour l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation des substances chimiques (voir encart).

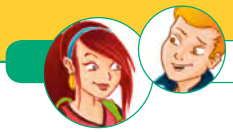
Le règlement REACH

La règlementation

Les objectifs de REACH sont :

1. la maîtrise du risque chimique ;
2. la protection de la santé humaine et de l'environnement ;
3. la libre circulation des substances au sein du marché européen ;
4. le renforcement de la compétitivité et de l'innovation européenne.

La mise en application de REACH concerne 143 000 produits et 65 000 sociétés européennes, coûte très cher, environ neuf milliards d'euros et entraîne un gros travail supplémentaire pour les industriels producteurs, importateurs et distributeurs de produits chimiques. En effet, ceux-ci doivent enregistrer les produits utilisés dans les agences d'États chargées de veiller à l'application de REACH et de l'évaluation des dossiers.



La chimie de REACH et la chimie pour REACH

Remarque

Pas de données, pas de dossier d'enregistrement, pas de marché en Europe.

L'enregistrement des substances

Une substance chimique ne peut être mise sur le marché en Europe que si elle a fait l'objet d'un dossier technique d'enregistrement.

Pour optimiser les efforts, un seul dossier technique par substance doit être déposé, donc les industriels qui la produisent ou l'utilisent doivent se regrouper.

Les données demandées sur les dangers des substances sont résumées dans l'encart ci-dessous.

Les données demandées sur les dangers des substances

- **Dangers physico-chimiques :** explosivité, inflammabilité, pouvoir comburant.

- **Dangers pour la santé humaine :** toxicité aiguë, irritation, sensibilisation, effets cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques (CMR), toxicité spécifique sur organes cibles par exposition unique ou répétée.

Dangers pour l'environnement (aquatique) : toxicité, biodégradation, bioaccumulation.

Nécessité d'examiner les propriétés intrinsèques selon des méthodes standardisées :
- assurer la comparaison selon des critères homogènes, pouvoir classer les substances sur des échelles et communiquer sur leurs dangers (étiquetage, FDS) ;
- lignes Directrices de l'OCDE :
  - Acceptation Mutuelle des Données par les gouvernements des 34 pays membres
  - Méthodes standardisées
- stricte application des BPL (Bonnes Pratiques de Laboratoire) par des laboratoires agréés.

Établissement de la relation entre la dose (ou la concentration) d'exposition et l'effet observé

Pour certaines substances, les informations sur le danger chimique doivent figurer sur l'emballage et sont représentées par différents pictogrammes qui symbolisent les classes de danger associé (*Figure 1*).

Figure 1

Pictogrammes marquant le danger chimique.

Des fiches de sécurité doivent être liées à chaque produit.

Les études à réaliser par les industriels dans le rapport à fournir pour enregistrer un produit sont résumées sur la *figure 2*.

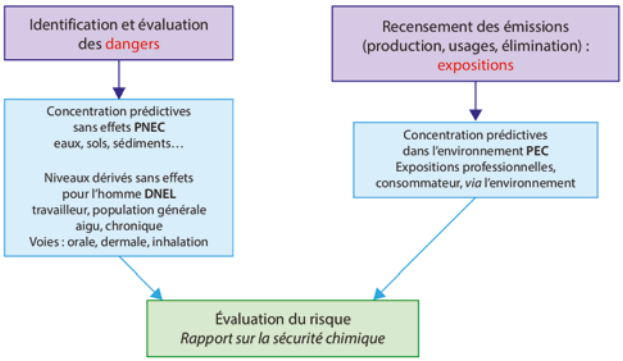


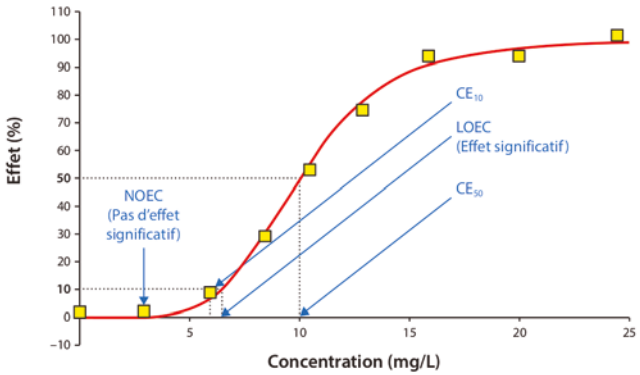
Figure 2

Le risque intègre le danger et l'exposition aux émissions.

Pour savoir si un effet nocif est significatif, il faut réaliser de nombreuses expériences afin d'établir la relation entre la dose ou la concentration d'exposition et l'effet étudié (*Figure 3*).

Figure 3

La notion d'effet significatif : relation entre effet et concentration.



Dans le rapport final soumis à l'évaluation du risque pour le dossier d'enregistrement REACH, des résumés notifient les seuils à ne pas dépasser pour assurer la maîtrise des risques.

L'application de la réglementation REACH réclame de nombreuses expériences et caractérisations dans lesquelles la chimie est largement sollicitée :

– pour renseigner les propriétés des différents produits et sous-produits notamment dans les études toxicologiques (en chimie analytique) ;

– pour chercher et **trouver de nouvelles substances ou de nouveaux procédés en remplacement de ceux jugés à risque** pour la santé ou l'environnement. Ces recherches sont associées aux analyses de risques, aux analyses toxicologiques et écotoxicologiques. Cet objectif a entraîné le développement d'**innovations dans le choix des matières premières** et dans **la modélisation des propriétés** ;

– pour la conception des produits qui prend maintenant en compte **l'analyse du cycle de vie** afin d'anticiper comment un nouveau produit se comportera dans l'environnement et comment il pourra éventuellement être recyclé.

Remarque

Cet objectif a un impact sur les industries des secteurs avals qui utilisent des mélanges de plusieurs produits chimiques de base, sur l'industrie des matériaux, notamment des matériaux organiques.

L'évaluation des produits

L'évaluation vérifie que les industriels respectent les obligations. Il y a deux types d'évaluation :

– l'évaluation des dossiers faite par l'agence ECHA (Agence européenne des produits chimiques) ;

– l'évaluation des substances répartie dans des agences des États de l'Union européenne qui examinent l'ensemble des données disponibles concernant une substance avec l'objectif de connaître et maîtriser les risques.

En France, c'est l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) qui réalise l'évaluation des substances qui lui sont confiées, à partir d'une analyse approfondie dont la démarche est résumée dans la *figure 4*.

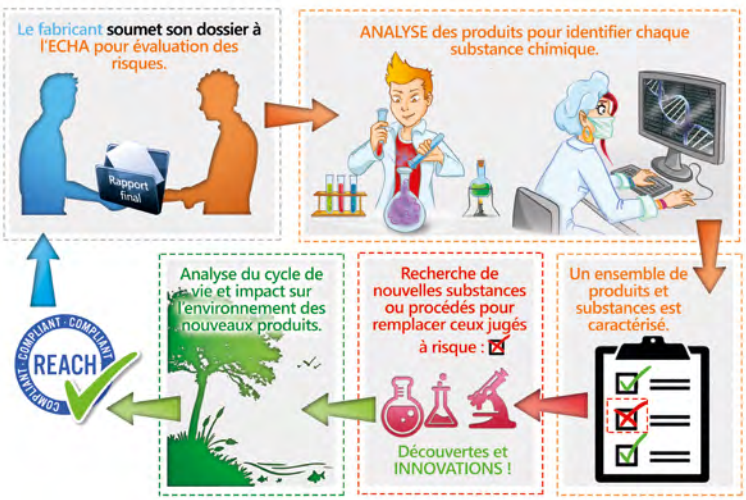


Figure 4

La démarche d'évaluation d'un dossier d'un produit à risques.

Le processus d'évaluation des substances chimiques à risques a été mis en place en 2012. La *figure 4* montre que le travail est long et complexe, les premières décisions ont été prises fin 2013 !

Remarque

Le coût des études est parfois très élevé (plusieurs dizaines à centaines de milliers d'euros), ce qui est lourd pour les entreprises, mais après huit années de pratique de REACH, l'objectif d'accroître la connaissance des dangers et des risques sur les substances chimiques industrielles est atteint et permet une meilleure maîtrise des risques associés.

La chimie verte, c'est quoi ?

« Le ***développement durable*** répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » 1987, M^me^ Gro Harlem Bruntland (Premier ministre norvégien).

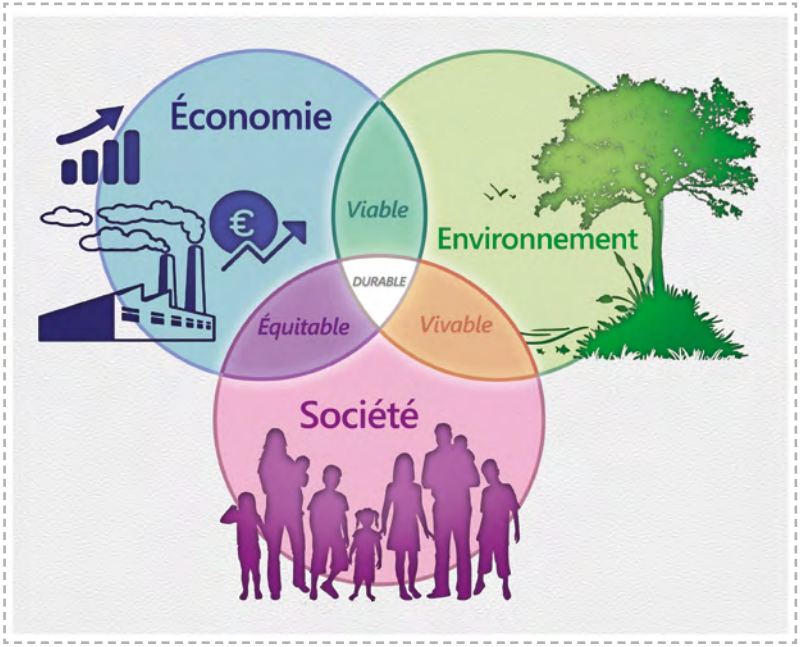
Le développement durable est aujourd'hui le mariage de trois composantes :
– le respect de l'environnement ;
– le développement économique ;
– l'acceptation sociale.

La prise en compte des impératifs du développement durable, favorisée par la réglementation REACH, a conduit à une sélection de produits et de procédés que l'on a appelée **la chimie verte.**

La chimie verte est donc au centre de quatre grandes problématiques (*Figure 5*) :
– les contraintes environnementales ;
– l'efficacité économique ;
– l'innovation scientifique ;
– la demande des consommateurs.

Figure 5

La chimie verte : c'est quoi ?



« La ***chimie verte*** est un concept qui soutient la création de produits ou de procédés qui réduit ou élimine l'usage et la formation de substances dangereuses. Ses objectifs sont :
- réduire et prévenir la pollution à sa source ;
- minimiser les risques et optimiser l'efficacité des choix chimiques. »
Paul T. Anastas (1991).

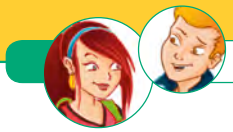
Les douze principes de la chimie verte datent de 1998 et ont été formulés par Paul Anastas. Ils résument le guide proposé aux actions scientifiques et industrielles concernées (*Figure 6*).

Figure 6
Les 12 principes de la chimie verte.

Plusieurs synthèses de produits de base ont été revues dans l'industrie et sont **devenues « vertes ».** Beaucoup de travaux sont développés dans l'industrie pour mettre sur le marché de **nouveaux produits qui respectent les principes de la chimie verte.**

En France, les travaux les plus innovants dans ce domaine sont récompensés chaque année par **le prix Pierre Potier** : « L'innovation en chimie en faveur du développement durable » (organisé par l'Union des industries chimiques, la Fondation de la Maison de la Chimie et le ministère de l'Industrie).

Les nouvelles peintures à l'eau qui ne sentent plus mauvais et ne font plus mal à la tête résultent de l'application des principes de la chimie verte.



Les industriels ont développé de nombreuses recherches pour **remplacer les solvants toxiques,** par exemple en utilisant des produits solubles dans l'eau ou pour certaines réactions dans du gaz carbonique sous forte pression.

La chimie verte a aussi beaucoup contribué au développement de **l'utilisation de matières premières issues de la biomasse** et des procédés issus des biotechnologies.

Conclusion

Cette nouvelle chimie du XXIe siècle veille à la préservation de l'avenir des Hommes tout en améliorant leur vie d'aujourd'hui. Les impératifs du règlement européen REACH sont un stimulant concret pour cette nouvelle chimie dans le présent et pour le futur, et laissent une grande place aux études innovantes.
La rigueur de la réglementation entraînera un contrôle accru de l'utilisation des substances chimiques, qui non seulement protègera notre santé et notre environnement, et qui bien géré, deviendra un réel avantage compétitif des activités de production de la chimie européenne.

LES NANO-OBJETS : UN AVENIR PROMETTEUR MAIS SOUS CONTRÔLE

Le nanomètre

On connaît bien le système métrique, le **mètre** est la dimension la plus connue, on sait qu'il faut 10 secondes aux champions pour courir 100 mètres (10^2 m), et que la taille moyenne des français est environ 1,70 m.

Le **micron** ou micromètre est mille fois plus petit que le millimètre (10^{-6}m), c'est à peu près la taille d'un globule rouge qui se balade dans notre sang, c'est 50 fois plus petit que le diamètre d'un cheveu.

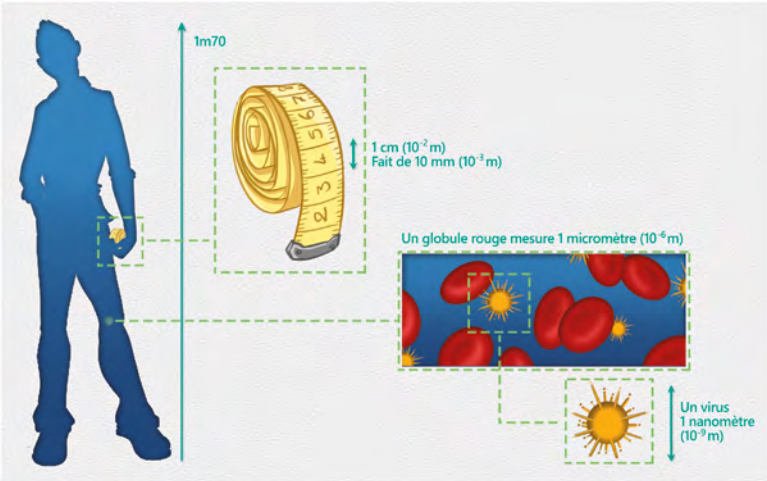
Le **nanomètre** (10^{-9} m) est lui, encore mille fois plus petit que le micron, ce qui équivaut à la taille d'un virus. En 2015, les progrès de la gravure en électronique ont permis de faire des transistors de 20 nanomètres, c'est-à-dire 25 000 fois moins que l'épaisseur d'un cheveu pour être utilisés dans des objets miniaturisés.

Avec le nanomètre, on entre dans le domaine de l'**infiniment petit**, visible seulement grâce à des microscopes électroniques très puissants. C'est pourquoi les nano-objets sont invisibles à l'œil nu.

Le ***centimètre*** est le centième de mètre (10^{-2} m) et sur une règle double décimètre, on en compte 20. Le ***millimètre*** est le millième du mètre (10^{-3} m) et cela correspond aux petites divisions sur une règle, il y en a 10 par centimètre.

Figure 1

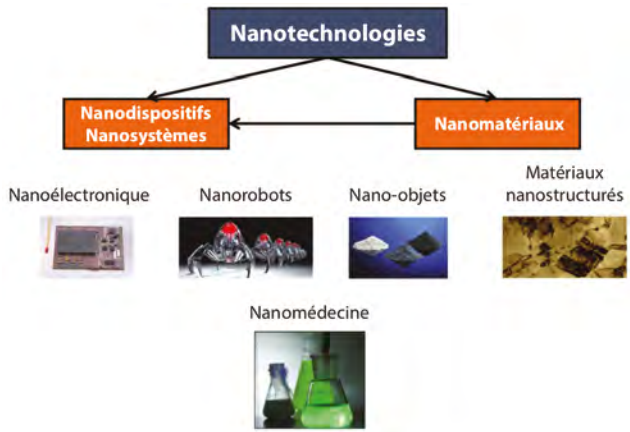
Le nanomètre : le domaine de l'infiniment petit.



Le nanomonde

Figure 2

Des nanotechnologies aux nanomatériaux et aux nanodispositifs.
Sources : matériaux nanostructurés : CNRS Photothèque – Champion Yannick.



Un ***nano-objet*** est un objet qui a une, deux ou trois dimensions externes à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire entre 1 et 100 nanomètres, une nano-particule 3, une nano-plaquette 2, un nanotube ou nano-fibre 2.

Les ***nanotechnologies*** sont les techniques permettant de créer des matériaux ou des objets ou des systèmes qui font appel à de nouvelles propriétés qui découlent de ces dimensions nanométriques.

Les applications en nanoélectronique (*Figure 2*) sont utilisées dans les smartphones et ordinateurs portables et leur permettent d'avoir des capacités de mémoire et de calcul fantastiques. On fabrique aussi des nano-robots ou nano-drones aussi petits qu'une abeille.

Il existe également des polymères nano-structurés qui sont bien plus résistants que les plastiques courants. Dans les matériaux composites, les nanotubes de carbone renforcent les polymères. En médecine, la nanochimie et la nanovectorisation délivrent la molécule thérapeutique sur la tumeur à soigner.

La pollution par les nano-objets

Nous sommes tous exposés aux nano-objets, citons les nanoparticules de dioxyde de titane TiO_2 que l'on trouve dans les peintures, les cosmétiques et crèmes de protection solaire, l'oxyde de cérium CeO_2 utilisé dans les pots catalytiques des automobiles, les nanosilices nanostructurées (25 à 50 nm) et certains types de nanotubes de carbone pouvant atteindre en longueur plusieurs microns.

Un ***matériau nanostructuré*** a une structure interne ou de surface à l'échelle nanométrique, exemple les zéolithes pour les chimistes en catalyse.

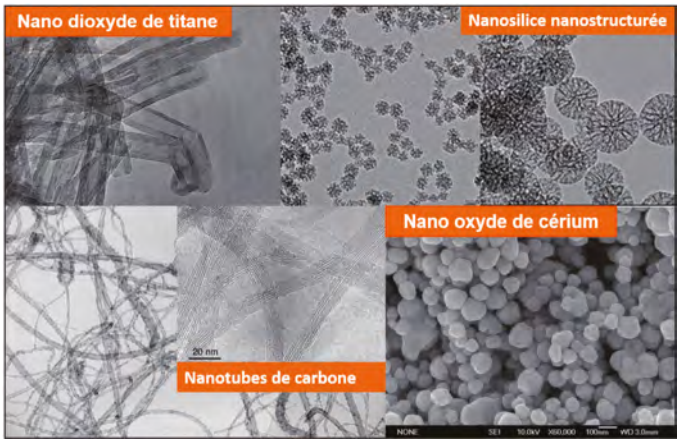


Figure 3

Exemples de nano-objets : nano TiO_2, nano CeO_2, nano SiO_2, nano-tube de carbone. *Sources : nano dioxyde de titane : CNRS Photothèque - UMR8502 - Laboratoire de physique des solides d'Orsay ; nanotubes de carbone : CNRS Photothèque - Masenelli-Varlot Karine (gauche) et Loiseau Annick (droite).*

La réglementation

Un ***nanomatériau*** est un matériau qui a au moins une dimension externe ou interne à l'échelle nanométrique.

La réglementation ne peut éditer des normes que pour les nano-objets manufacturés. Par exemple, la réglementation REACH européenne s'applique aux nanomatériaux depuis 2005. Beaucoup de mesures techniques ont été publiées par le Comité européen de normalisation (CEN) et en France, par l'AFNOR (Association française de normalisation).

Pour vérifier que les normes soient bien respectées par les produits industriels, il faut pouvoir les caractériser et il n'est pas facile de les mesurer à cette échelle de quelques nanomètres.

Les mesures de vérification de REACH

1. Mettre au point des protocoles spécifiques de caractérisation.
2. Valider la reproductibilité des protocoles avec un panel de dizaines de laboratoires reconnus et labellisés pour leur compétence.
3. Étudier cas par cas, les nouveaux produits et problèmes posés.
4. Examiner le produit et son élaboration ou usage de sa naissance à son recyclage ou destruction finale.
5. Harmoniser la législation au niveau européen et mondial sur les normes techniques.

Les ***nanomatériaux manufacturés*** ou industriels sont fabriqués en quantité dans un but commercial pour faire profiter de leurs propriétés. Comme exemple, les nanoparticules de dioxyde de titane TiO_2 pour les protections aux rayonnements UV du Soleil, les nanotubes de carbone pour leurs propriétés mécaniques ou électriques.

Il y a malheureusement une catégorie sur laquelle les normes n'ont aucun pouvoir ; il s'agit des nano-objets relevant de la « pollution ambiante » car quel que soit l'endroit en ville, il se trouve de 20 000 à 30 000 nano-objets par millimètre cube d'air, en immense majorité non manufacturés ; on parle de nanomatériaux incidents. On sait approximativement les caractériser mais difficilement les évaluer.

Les ***nanomatériaux incidents***, ils sont présents en quantité importante dans notre environnement. Les particules fines des émissions des vieux moteurs diesels, les poussières en ville émises par les chauffages au bois, les pollens de centaines de plantes, les poussières des plaquettes de freins des automobiles, les particules métalliques issues du freinage des roues métalliques du métro ou des trains. Ils peuvent présenter des risques pour la santé tels qu'affections pulmonaires, allergies…

Les dangers pour l'Homme et son environnement

Toxicologie

La toxicité des nano-objets et nanoparticules peut être aiguë ou chronique, c'est-à-dire dans un cas provoquer une crise d'allergie souvent respiratoire, dans l'autre constater une diminution progressive de la capacité respiratoire qui évolue vers une bronchite chronique.

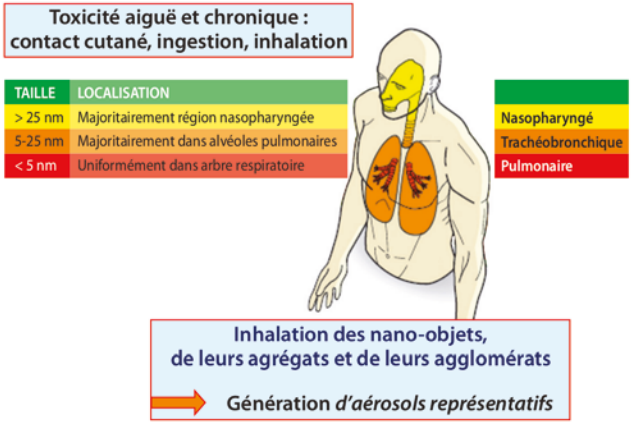


Figure 4

Effets toxicologiques des nano-objets sur le corps humain.
Source : D'après le document de présentation 2009 du débat public « Développement et régulation des nanotechnologies » préparé par sept ministères suite à la loi Grenelle 1.

Les nano-objets pénètrent dans l'organisme par contact cutané, ingestion, mais surtout par inhalation. Le point le plus important pour étudier les effets sur les organismes, notamment sur les plantes et les animaux, est de générer expérimentalement des aérosols représentatifs au cas par cas avec des protocoles bien définis et reproductibles.

Les exemples les plus connus sur les organismes humains sont les maladies respiratoires dont souffrent les mineurs qui travaillent de longues heures par jour dans une atmosphère où diffusent des nanoparticules de silices et de charbons. Ils sont tous atteints, après quelques années, de silicose et souvent meurent prématurément d'insuffisance respiratoire.

Des cosmétiques à risque

Un autre exemple qui a défrayé la chronique était les possibilités des nano-particules de TiO_2 (dioxyde de titane) utilisées dans les crèmes cosmétiques, de franchir par contact, le derme de la peau et de se retrouver dans le sang. Des études récentes menées par plusieurs laboratoires de biologie montrent qu'elles ne franchissent pas la barrière du derme.

La dissémination

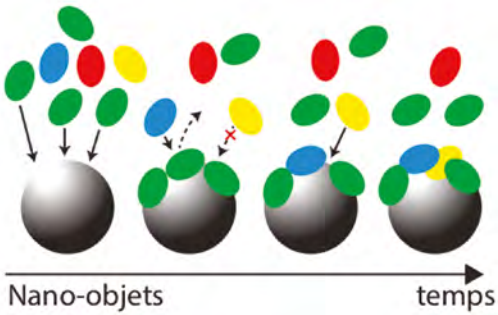


Figure 5

Représentation de l'effet Corona : les (macro) molécules dans les milieux biologiques et dans l'environnement s'adsorbent sur les nano-objets.

La dissémination des nano-objets dans notre environnement comme quantités de produits chimiques naturels ou manufacturés est un sujet crucial pour la recherche. Des dispositifs expérimentaux sont utilisés, ils reproduisent les conditions naturelles de vie des espèces végétales ou animales. Ce sont des serres qui abritent des carrés de culture simulant le mésocosme naturel en milieu clos.

L'effet Corona

En ce qui concerne la pollution atmosphérique des villes, on connaît les particules qui ont fixé des HAP (Hydrocarbure Aromatiques Polycycliques) à leur surface et qui sont considérées comme cancéreuses.

Les nanoparticules ont des propriétés de surface exacerbées. Les propriétés d'adsorption de molécules chimiques sont très fortes et elles peuvent donc faire pénétrer avec la particule, un bouquet de polluants fixés en surface. Il faut donc prendre en compte pour les études de toxicité : la composition chimique, la structure cristalline mais aussi la distribution de tailles, de formes, la surface spécifique et la chimie de surface, les charges électriques. Toutes ces propriétés vont fortement influer sur la pénétration des membranes biologiques des cellules.

Maîtrise des risques des nano-objets

On ne peut bien maîtriser que ce que l'on connaît. Dans le cas des nano-objets industriels, il faut d'abord connaître la nature de ces objets, puis évaluer ou mieux mesurer leur dissémination, c'est-à-dire la concentration par volume d'air qui définit le degré d'exposition des personnels. Ces points étant définis, il faut alors trouver les moyens de protection des personnels et des utilisateurs, ventilation, manipulations sous protection, etc.

Les produits industriels et NANOSAFE

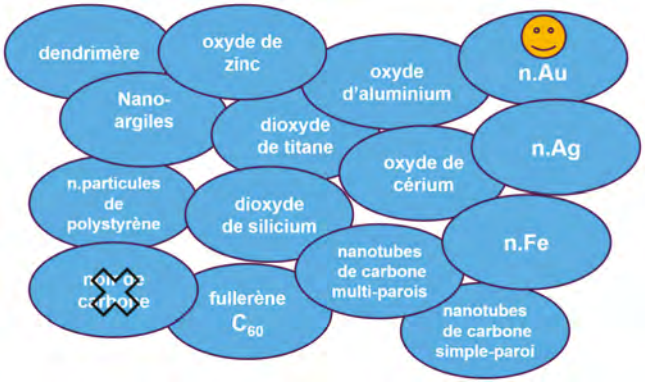


Figure 6

Les 14 produits industriels du « Working Party on Manufactured Nanomaterials » en cours d'analyse par l'OCDE.

Ces produits sont maintenant nombreux, ils ont été répertoriés par un comité de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) et peuvent être classés en trois familles :

– les nano-organiques, les dendrimères, les polystyrènes, les fullerènes, les carbones sous toutes les formes, les nanotubes en particulier ;
– les nano-minéraux, les argiles, l'oxyde de zinc ZnO, de titane TiO_2, la silice SiO_2, l'oxyde de cérium CeO_2, l'alumine Al_2O_3 ;
– les nano-métaux, l'or Au, l'argent Ag, le fer Fe.

La sécurité dans la production et l'utilisation des nano-objets a été prise en compte dès 2002/2003 par le programme européen NANOSAFE qui a édité de nombreux documents accessibles aux industriels et

particuliers. Ces documents ont trait notamment à la mise en œuvre des systèmes de filtration, à la protection contre les aérosols, aux mesures d'exposition.

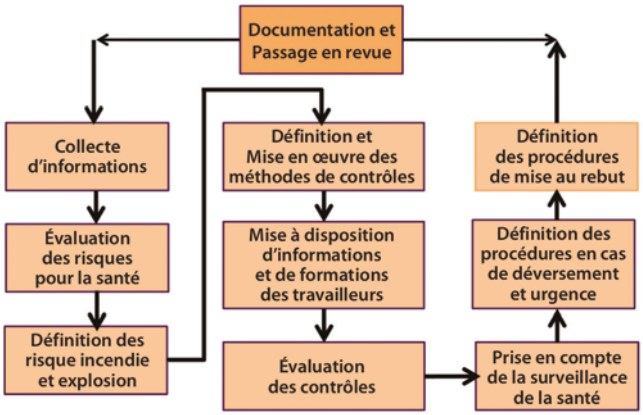
Des fiches de sécurité ont été élaborées par l'INRS (Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles). Certaines ont été reprises par l'AFNOR (Association française de normalisation).

Les moyens

Face aux risques il faut prévenir et protéger.

Figure 7

Les étapes clés de la maîtrise du risque.



Pour les nano-objets, le danger est au départ, parfois inconnu. Il faut dans un premier temps, l'évaluer et identifier le nano-objet auquel peuvent être exposés les travailleurs.

Dans un second temps, il faut se référer au règlement (le code) et pour rester dans les normes admissibles, mettre en jeu des solutions telles que le prélèvement à la source, la ventilation collective, les équipements de protection individuelle.

Auparavant et en même temps, l'évaluation des risques pour la santé, éventuellement les risques d'incendie si les nanoparticules sont inflammables, auront été considérés. Il faut aussi mettre en place les contrôles et analyses régulières, former le personnel aux gestes et comportement de sécurité et travailler à un suivi régulier avec l'ingénieur sécurité et la médecine du travail.

Les plateformes

Plusieurs pays ou industries ont organisé des centres de recherche et de prévention pour les nanotechnologies.

Figure 8

La plateforme Nano Sécurité du CEA à Grenoble.

En France, c'est le commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) qui a développé une approche globale de la nano-sécurité avec la Plateforme Nano Sécurité (PNS) située à Grenoble. Sur 2 000 m², sept salles dédiées à la recherche et à la sécurité dans les différents domaines essentiels : détection et mesures, modélisation, expertise médicale et biologique, toxicologie, écotoxicologie, formation des personnels, et même interventions puisqu'une unité de pompiers spécialisés prêts à intervenir y est affectée.

Communication

Les nanotechnologies ont été l'objet de diverses controverses en France, ceci en raison d'une communication pas toujours adaptée aux différents publics (grand public, politique, etc.). Bien que fascinée par les technologies futuristes, la population reste toujours un peu frileuse face à des technologies encore inconnues.

Gestion des risques, principes de précaution ont jusqu'à maintenant freiné le développement des nanotechnologies en France.

Néanmoins, la transparence d'un discours politique et scientifique, des normes accessibles à tous, un étiquetage généralisé des produits permettront un essor de cette nouvelle technologie.

Conclusion

Les nano-objets sont une véritable prouesse technologique mais doivent être maîtrisés dans leur conception et leurs applications pour permettre une utilisation optimum et sans danger.

LES FAIBLES DOSES DES POLLUANTS SONT-ELLES DANGEREUSES ?

Nous utilisons dans notre vie moderne plus de 110 000 molécules ou produits différents dont il reste obligatoirement des traces plus ou moins importantes dans l'air, le sol, les aliments et finalement l'eau qui joue un peu le rôle de réceptacle final de toute cette pollution environnementale.

Cette présence de polluants est maintenant connue grâce aux progrès spectaculaires des techniques d'analyses.

L'inquiétude sur les conséquences sur la santé date des années 1990 quand on s'est aperçu que certains produits pouvaient avoir des effets perturbateurs sur la faune et sur la santé humaine, non seulement à partir d'une certaine concentration, **mais aussi avec des faibles doses de polluant durant une longue période d'exposition.**

Remarque

Dans un litre de solution, on savait dans les années 1980 détecter 1/1 000 grammes de produit, alors qu'aujourd'hui, on sait couramment détecter 1/1 000 000 000 grammes, c'est-à-dire l'équivalent d'un morceau de sucre dans une piscine olympique !

Comment définir la faible dose toxique ?

La première cible d'investigation du vivant est l'observation des effets sur l'Homme. La seconde est l'observation des effets à des doses relativement faibles sur les animaux.

Les deux outils les plus utilisés pour évaluer ou prévoir la toxicité d'une substance sont la **toxicologie** et l'**épidémiologie.**

Le ***National Toxicology Program*** (NTP) aux États-Unis définit la faible dose comme celle sans effet décelable par les outils d'analyse.

La ***toxicologie*** est l'étude et l'identification des substances toxiques pour les organismes ou les systèmes biologiques.

Pour avoir un sens, les études épidémiologiques doivent être faites sur un grand nombre de cas (10 000) et détecter un effet sur au moins 2 % d'entre eux. Il faut parfois attendre longtemps pour observer un effet significatif.

L'***épidémiologie*** est l'étude des effets de produits toxiques ou présumés toxiques sur des populations humaines.

Comment étudier les effets toxiques des faibles doses ?

Les outils

On dispose maintenant **de biomarqueurs** qui réagissent à des doses très faibles et révèlent des effets dans le fonctionnement soit du corps entier, soit au niveau de la cellule. Il existe deux types de biomarqueurs :

– **les biomarqueurs d'exposition :** leur présence est détectée sans être forcément déjà liée à un effet sanitaire observable. Par exemple, on détecte de la poussière de charbon dans les poumons sans observer de cancer déclaré ;

– **les biomarqueurs d'effets :** certains types de cellules sont des biomarqueurs précurseurs de cancers. La présence de certaines molécules dans les cellules est un biomarqueur d'effet toxique. Par exemple, la protéine de l'œuf chez un poisson mâle est le marqueur d'un début d'évolution vers le changement de sexe du poisson.

Les méthodes

Pour prévoir à partir des effets significatifs observés pour certaines doses, ce qui devrait se passer à des doses plus faibles ou pendant des temps plus longs, trois méthodes sont utilisées (*Figure 1*). Elles sont développées ci-après.

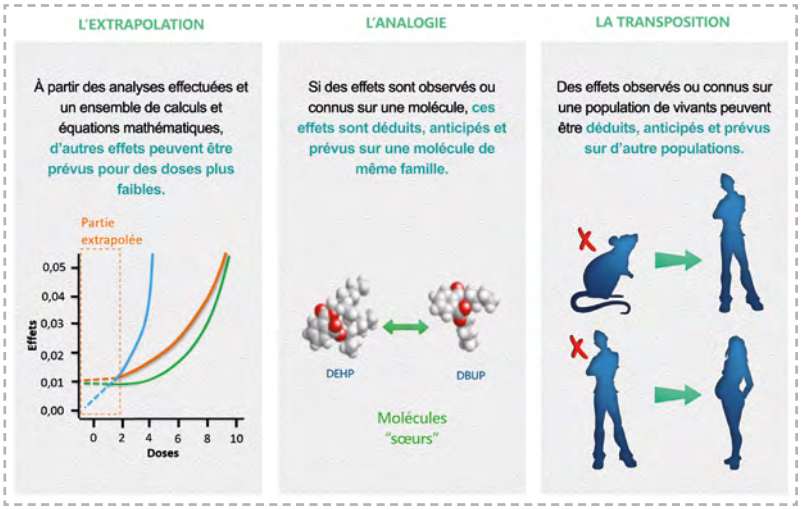


Figure 1

Les modèles : transposition, extrapolation et analogie, les trois logiques traditionnelles d'études des faibles doses sur des longues durées.

L'extrapolation – Le principe est le suivant :

1. les effets observés sont modélisés sous la forme de courbes de réponse en fonction des doses, à partir de méthodes mathématiques ;
2. à condition de s'assurer de la continuité des mécanismes d'action du polluant, on utilise ces courbes pour prévoir à des doses très faibles, une réponse non observable avec les méthodes actuelles.

L'analogie

À partir des effets d'un composant bien connu y compris à faible dose, on essaie d'en tirer des conclusions pour un composant de la même famille chimique ou qui a les mêmes caractéristiques.

La transposition

À partir de ce qui est observé chez un animal, on en déduit les effets possibles chez l'Homme. De même, des effets observés sur une population d'hommes peuvent être transposés aux femmes ou encore aux enfants.

Remarque

Le problème est que les effets observés sur l'animal ou sur une cellule ne sont pas obligatoirement significatifs pour l'Homme. Le rat est beaucoup plus sensible que l'Homme au bisphénol.
En revanche, les nourrissons éliminent moins le bisphénol que les adultes.

Les étapes de l'étude toxicologique

Les étapes à franchir pour connaître les effets des polluants jusqu'au niveau de la cellule sont résumées sur la *figure 2*.

Que ce soit sur l'homme ou sur l'animal, il faut étudier :

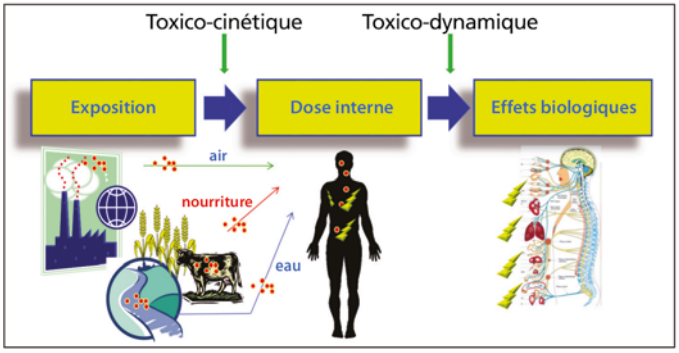
– comment le polluant pénètre à l'intérieur du corps ;

– où il se localise dans le corps, et à quelle concentration : c'est **l'étude toxico-cinétique** qui permet de déterminer **les doses internes ;**

– pour une dose interne donnée, et selon la localisation, le mécanisme d'action du polluant : ses transformations par les réactions chimiques ou biochimiques, son transport dans l'organisme, ses effets biologiques. Cette étude complexe qui peut aller jusqu'à l'étude au niveau de la cellule est **l'étude toxico-dynamique.**

Figure 2

Modélisation PBPK : utilisation de la toxicocinétique pour passer de la notion d'exposition à celle de dose interne, puis de la toxicodynamique pour passer de la notion de dose interne à celle des effets biologiques.



L'étude toxico-dynamique

La *figure 3* illustre les échanges entre les organes et les tissus du corps humain.

Pour les polluants de l'air, les doses internes respirées se localisent dans les poumons tandis que pour la nourriture et pour l'eau, elles se localisent d'abord dans les intestins.

Elles passent dans le sang (en bleu ou en rouge sur la *figure 3*) directement à partir des poumons ou à travers le foie à partir des intestins, et la *figure 3* montre qu'elles sont alors transportées vers tous les organes.

Au cours de tous ces échanges, les doses internes de molécules polluantes sont transformées par des réactions biochimiques en agents actifs qui peuvent entraîner des modifications biologiques au niveau des cellules des différents organes.

La ***métabolisation*** est l'ensemble des mécanismes biologiques de transformation des doses internes de polluants en agents actifs au niveau des cellules des organes. Les agents actifs sont les métabolites.

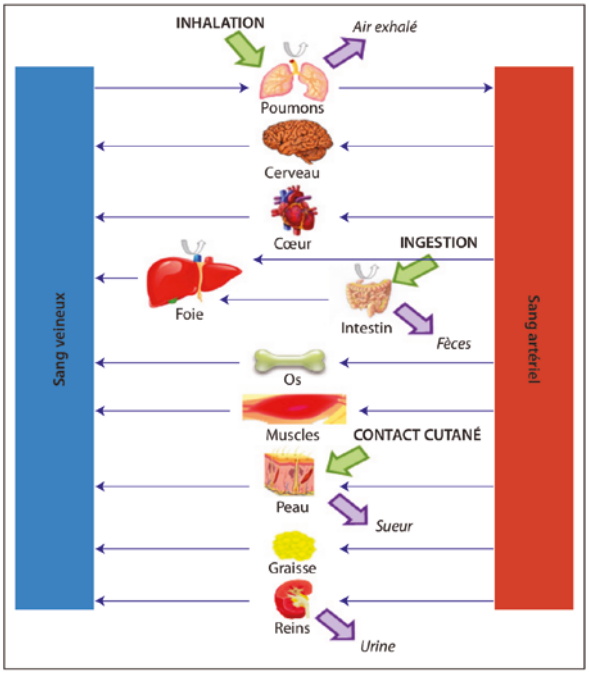


Figure 3

Modélisation des relations d'échanges entre les différents organes et tissus.

La compréhension des mécanismes de métabolisation est très importante pour l'étude des effets des faibles doses.

Pour pouvoir, à partir des effets observés à une certaine dose, **extrapoler** les effets à une dose plus faible, il faut s'assurer que **la métabolisation du polluant reste la même,** ce qui n'est pas toujours le cas.

L'exemple du tetrachloroéthylène

Par exemple, on sait que le tetrachloroéthylène (solvant très utilisé dans les teintureries) est toxique et entraîne pour l'Homme des maladies des reins, des nerfs et du foie.
Il se métabolise, en partie, en acide trichloracétique qui est le métabolite toxique.
Plus la dose interne de tetrachloroethylène est importante, plus la métabolisation en acide trichloracétique est grande.
La toxicité du tetachloroethylène augmente donc aux faibles doses et ces études ont conduit à abaisser les doses acceptées d'exposition.
Pour pouvoir transposer les effets observés sur l'animal à l'Homme, il faut que la métabolisation soit la même, ce qui n'est pas effectif.

La divination du non-observable

Figure 4

On ne connaît pas les effets à long terme !

Le problème de toxicité des faibles doses est qu'il apparaît au terme d'une longue période d'exposition. Il faudrait pouvoir prédire, en quelque sorte, un effet que l'on ne connaît pas.

Une modélisation scientifique rigoureuse future pourra répondre à ce questionnement complexe.

On sait **extrapoler** aux faibles doses, des courbes effets–doses qui résultent des études toxico-cinétiques et toxico-dynamiques.

Mais il faut connaître les différentes étapes de la métabolisation, c'est long et très compliqué.

Remarque

Meilleure sera la connaissance des mécanismes, plus l'incertitude sera réduite pour extrapoler aux faibles doses.

Faut-il encore améliorer la qualité de l'eau potable ?

Bien que l'eau potable en France soit d'excellente qualité, il est possible d'y détecter des traces de nombreux micropolluants.

Mais ne nous affolons pas, car pour chacun d'eux, c'est à des concentrations de l'ordre du nanogramme par litre, donc l'équivalent d'un morceau de sucre dans une piscine olympique !

On y trouve :
– quelques molécules de pesticides ;
– une liste plus longue de molécules issues de médicaments, à des concentrations pouvant être cinq à dix fois plus importantes que celles des pesticides ;
– aucune hormone naturelle ou synthétique, ni aucun perturbateur endocrinien.

Ces concentrations sont dans tous les cas très en dessous des seuils d'effets biologiques sur l'Homme et sur les animaux.

Remarque

On se pose cependant la question de connaître les effets sanitaires à long terme de l'exposition simultanée à cet ensemble de polluants à très faible dose. On ne connaît pas actuellement la réponse, mais l'Europe est favorable au principe de précaution avec notamment une volonté de réduire à la source les substances potentiellement jugées les plus dangereuses.

Le cycle domestique de l'eau

Le cycle domestique de l'eau est représenté sur la *figure 5*.

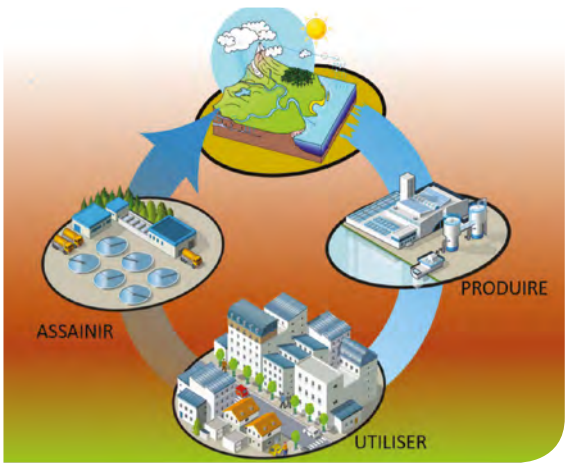


Figure 5
Le cycle domestique de l'eau.

Afin d'améliorer la qualité de l'eau que nous utilisons, les efforts sont faits à la fois sur l'assainissement des eaux usées et surtout sur le système de production de l'eau potable.

Assainissement des eaux usées

Les traitements extensifs

Les zones humides artificielles (*Figure 6*) favorisent l'élimination des micropolluants par :
– décantation ;
– pénétration naturelle dans le sol et filtration ;
– l'action du rayonnement ultraviolet de la lumière naturelle ;
– capture sélective à l'aide de plantes spécifiques.

Figure 6

Les zones humides artificielles, une combinaison d'écosystèmes pour favoriser : les différents processus d'élimination des micropolluants (interaction plantes/micro-organismes aux différentes interfaces sol/eau/air), la diversité écologique et l'intégration paysagère (design et gestion différenciée des différents habitats, trames vertes et bleues), les services écosystémiques apportés par les zones humides. On atteint ainsi plus de 70 % d'élimination de plus de la moitié des molécules étudiées.

Les traitements intensifs

Environ 70 % des micropolluants organiques sont éliminés par un traitement à l'ozone (O_3) qui casse les molécules et les oxyde suivi d'un traitement biologique qui finit leur « digestion » (*Figure 7*).

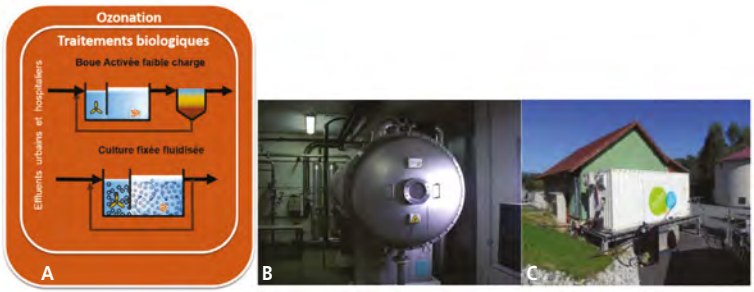


Figure 7

A) Couplage de l'oxydation chimique à l'ozone avec différents procédés de traitement biologique ; **B)** et **C)** mise en œuvre des procédés d'ozonisation par Suez Environnement.

Une autre solution encore plus efficace consiste à fixer ces micropolluants sur du charbon actif en poudre injecté dans des réacteurs (*Figure 8*).

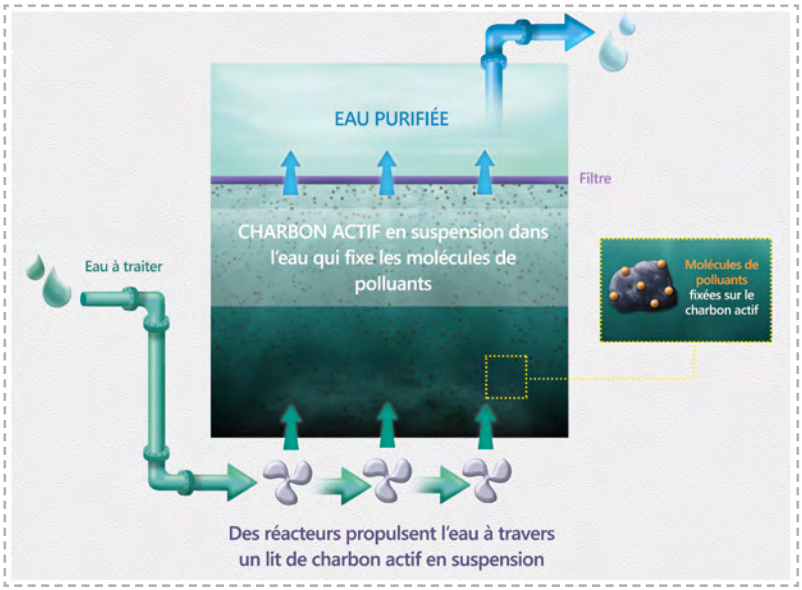


Figure 8

Procédé de traitement de l'eau au charbon actif.

Les techniques de traitement efficace pour l'assainissement et la potabilisation de l'eau existent mais il faut vérifier, par des tests biologiques, que les traitements intensifs comme l'ozonisation ne produisent pas de sous-produits toxiques.

La potabilisation de l'eau

Pour rendre l'eau d'une rivière par exemple, potable, on utilise un traitement extensif à base de procédés naturels couplé à un traitement intensif utilisant des procédés physico-chimiques (*Figure 9*).

– L'eau est pompée une première fois dans la nappe d'origine alluviale où elle a déjà subi une première filtration à travers le lit de la rivière.

– Elle est ré-infiltrée dans la nappe à travers des bassins d'alimentation dont le fond est tapissé de charbon végétal, ce qui lui fait subir une deuxième filtration.

– Elle est pompée une seconde fois et envoyée dans une filière de traitement physico-chimique : ozonisation ou charbon actif (*Figure 10*).

Remarque

L'eau obtenue est de très grande qualité même à partir d'une source relativement dégradée.

Figure 9

Les différentes étapes de la potabilisation de l'eau de rivière.

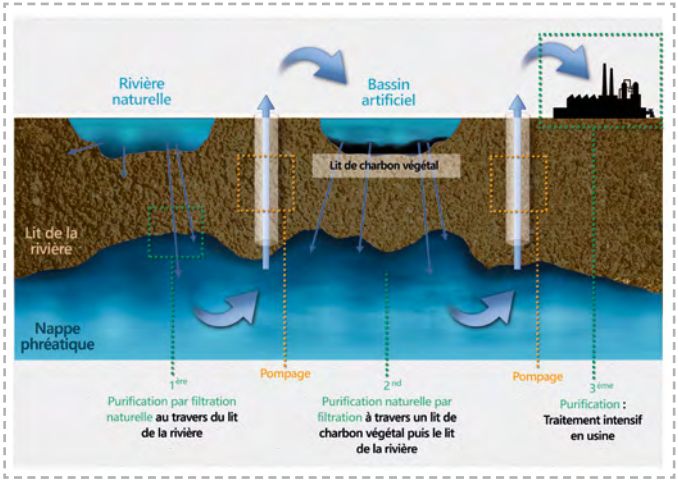


Figure 10

L'adsorption sur charbon actif en poudre en lit fluidisé, un procédé intensif de potabilisation de l'eau (unité pilote en plexiglas permettant de visualiser le lit de boue).

Dans des situations extrêmes, face à des molécules qui résistent à tous les traitements précédents, on utilise la filtration membranaire.

Ces procédés ont été utilisés pour le dessalement de l'eau de mer ou le traitement des eaux saumâtres. Ils sont très efficaces mais plus couteux. Ils permettent d'éliminer la plupart des micropolluants organiques et minéraux (*Figure 11*).

Figure 11

Équipements industriels de procédés de filtration membranaire (nanofiltration, osmose inverse).

Conclusion

Les phénomènes à étudier sont multiples. L'étude expérimentale difficile nécessite des recherches couplant non seulement chimie, physique et biologie mais aussi les sciences sociales, économiques et politiques pour faire la synthèse des résultats et savoir comment utiliser ces données pour comprendre le risque écologique ou sanitaire que cela peut réellement présenter.

LA BATAILLE DE L'EAU PROPRE

L'eau est indispensable à la vie – pas seulement la vie des humains, mais aussi celle des plantes et celle des animaux. Si la vie s'est installée sur la Terre, c'est parce que l'on y trouve de l'eau. Beaucoup d'eau. Cependant, 97 % du volume de l'eau, est salé.

Pour l'Homme en particulier, l'eau doit être douce, propre à la consommation, on dit potable.

Sur les huit milliards environ d'êtres humains qui peuplent aujourd'hui notre planète, on considère qu'environ deux milliards souffrent du manque d'eau potable.

Figure 1

L'eau indispensable à la vie.

Les causes de pollution de l'eau

L'eau naturelle peut ne pas être propre. Elle peut être polluée par les milieux qu'elle a traversés (des sites minéraux qui contiennent du soufre, par exemple). Plus couramment, dans notre existence, on trouve l'eau polluée par la vie animale ou végétale – les zones marécageuses ou la proximité de zones de séjour d'espèces animales. Mais en réalité, aujourd'hui, c'est l'activité humaine qui est le plus souvent responsable de la pollution de l'eau (*Figure 2*).

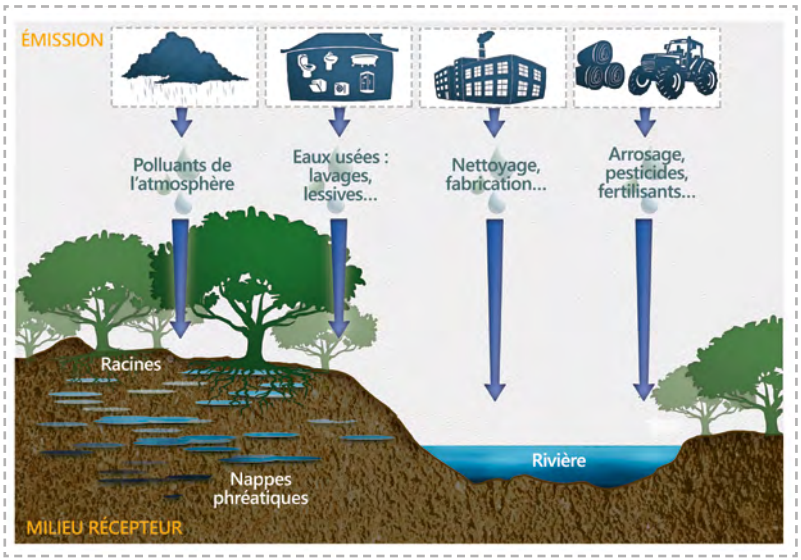


Figure 2

D'où vient la pollution de l'eau ?

La *figure 2* résume les différentes activités humaines responsables de la pollution de l'eau.

L'eau sale qui existe dans notre entourage **peut venir de la pluie** (qui entraîne les polluants de l'atmosphère), de l'eau rejetée **par les habitations** (lavages, lessives…), **de l'activité industrielle** qui implique toujours de l'eau, bien sûr pour le nettoyage mais souvent aussi pour les fabrications de produits et d'objets, ou **de l'activité agricole**, qui

repose bien sûr sur l'arrosage à grande échelle en plus du nettoyage, commun à tout le monde.

L'eau émise par toutes ces activités contient toutes sortes de polluants : des objets solides ou végétaux, des **polluants chimiques** (produits chimiques, éléments métalliques, molécules organiques, médicaments…), des **polluants biologiques** (petits animaux, vers ou larves par exemple, des bactéries, des virus…). Des phases grossières de purification peuvent avoir lieu sur les sites industriels ou les stations publiques, mais l'eau se retrouve en fin de parcours dans les nappes phréatiques, que l'on appelle les milieux récepteurs.

On voit comme la pollution de l'eau est un problème compliqué : il faut essayer de rendre les activités moins sales et il faut inventer des moyens de nettoyage – de dépollution – de l'eau efficaces.

L'état de pollution de l'eau que nous utilisons

Remarque

La peste de Londres, en 1854, a été reconnue comme un effet de la pollution de la Tamise et de l'eau de la ville (*Figure 3*).

Depuis longtemps, on sait que la pollution de l'eau peut conduire à des catastrophes. Mais c'est plus récemment que l'on applique des méthodes scientifiques pour identifier le problème. Dès la fin du XIX^{e} siècle, on a généralisé les prélèvements et les caractérisations des polluants.

Le *tableau 1* liste les substances que l'on trouve dans les eaux.

Figure 3

La fontaine de John Snow (Londres, 1854).
John Snow – memorial and pub.

Tableau 1 **On peut trouver tout ça dans les eaux !**

Les différentes substances présentes dans l'environnement
Macropolluants
Nitrates, phosphates…
Micropolluants organiques
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Phénols, plastifiants. Solvants organochlorés. Phtalates, détergents. Pesticides. PCB. Substances pharmaceutiques et d'hygiène. Hormones. Nouveaux composés émergents. Nanoparticules.
Micropolluants inorganiques
Métaux et métalloïdes Pb, Hg, Cd, Ni, Cu, Zn, As, Cr, Co, Fe, …

Micropolluant : il s'agit d'un polluant présent en quantité très faible dont la concentration est de l'ordre du microgramme par litre.
Macropolluant : par opposition au micropolluant, le macropolluant comprend tous polluants dont la concentration dépasse le microgramme par litre.

Le nombre de substances chimiques présentes dans les eaux est inconnu. Ce sont seulement quelques dizaines qui, aujourd'hui, sont identifiées et suivies par les autorités réglementaires, mais le nombre total de substances chimiques potentiellement présentes pourrait être de plusieurs centaines. Il s'accroît d'ailleurs régulièrement avec les nouveaux produits utilisés par l'industrie et l'agriculture.

Depuis les années 1960, on constante une très nette croissance du nombre des molécules identifiées et suivies dans les eaux.

Cependant, grâce aux efforts des différents acteurs, les quantités de molécules nocives présentes sont en diminution.

Remarque

En Europe, on a adopté une réglementation, dénommée **REACH** qui impose à tous les professionnels d'indiquer les molécules présentes dans leurs produits, d'évaluer les dangers qu'elles peuvent présenter pour les usagers et d'obtenir les autorisations d'utilisation de l'agence de l'Union européenne compétente, située en Finlande.

La lutte contre la pollution

La santé publique exige que l'on diminue autant que possible la présence des molécules polluantes dans les eaux. Les orientations suivantes sont privilégiées :

– on purifie les eaux avant de les envoyer aux consommateurs au moyen d'installations de purification présentes un peu partout en France. Quelle que soit son origine, l'eau est stockée dans des réservoirs, filtrée et traitée chimiquement pour qu'elle soit propre à la consommation ;

– on veut que les eaux émises soient le moins polluées possibles. Pour ce faire, les industriels et les agriculteurs doivent respecter des seuils de quantités de rejet et d'utilisation pour des molécules données.

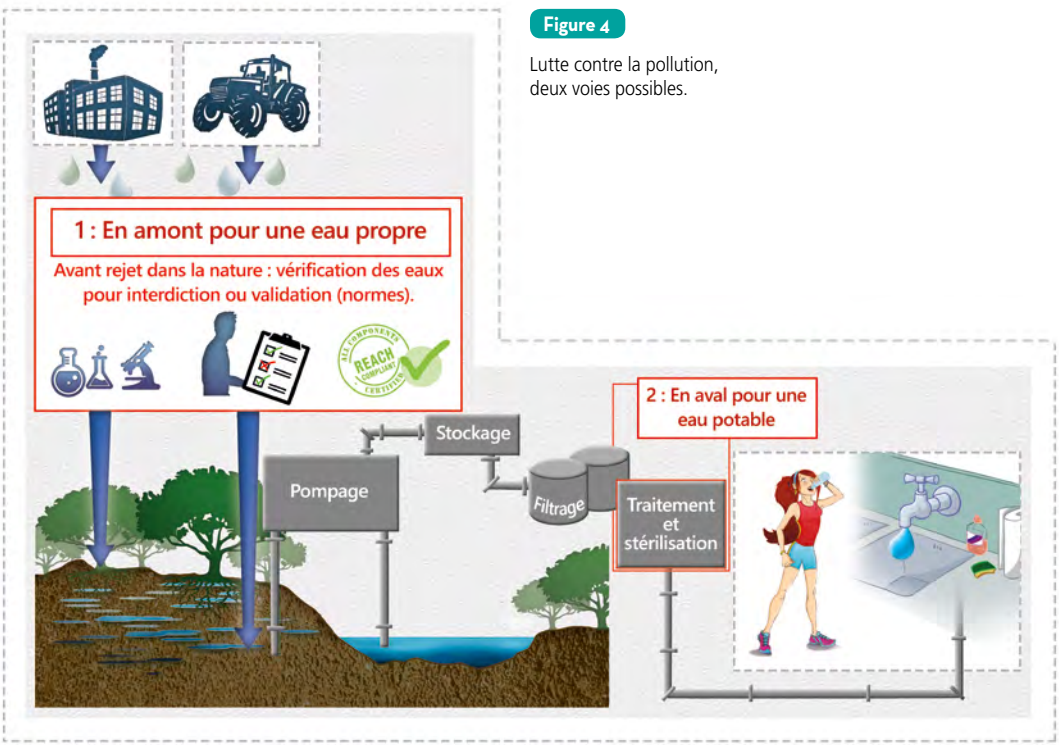


Figure 4

Lutte contre la pollution, deux voies possibles.

La mise en pratique conjointe de ces deux orientations a conduit vers des résultats satisfaisants. Effectivement, on a constaté, ces dernières années, une diminution des quantités de métaux (cadmium, mercure, plomb) et de molécules dangereuses (lindane, PCB) détectées dans l'océan Atlantique Nord. Cette mesure est intéressante car toutes les molécules émises dans l'environnement se retrouvent dans la mer ou l'océan, qu'elles soient véhiculées par les rivières ou émises directement dans la mer (*Figure 5*).

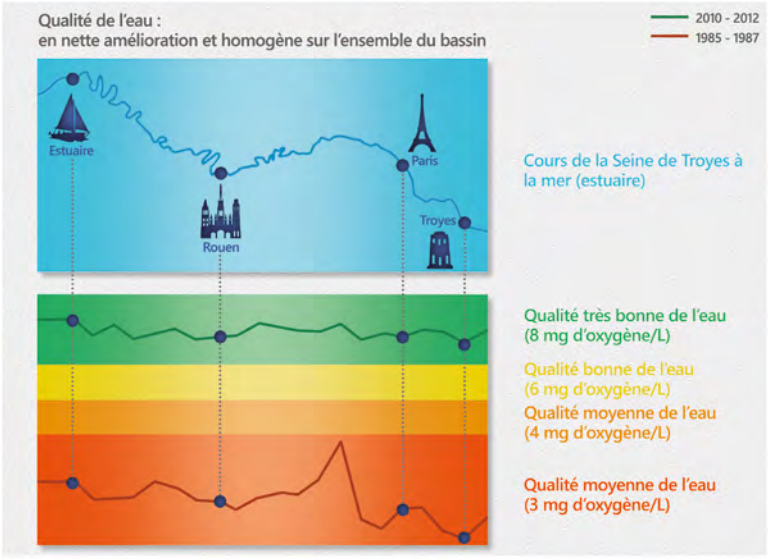


Figure 5

Vers une nette amélioration de la qualité de l'eau.

De nouvelles molécules dangereuses émergentes

Depuis que l'on étudie de plus près les molécules présentes dans les eaux, on découvre de nombreux rejets de médicaments. En effet, la consommation médicamenteuse dans les pays occidentaux est en forte croissance. Par ailleurs, les techniques d'analyse, plus performantes qu'auparavant, permettent de mieux les identifier.

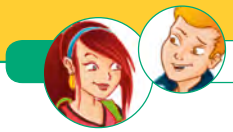


Figure 6

Les médicaments que nous prenons, bien souvent, polluent les rivières.

Le bisphénol A entre dans la composition de polymères utilisés dans de nombreux plastiques alimentaires.

Perturbateur endocrinien : molécule qui mime, bloque ou modifie l'action d'une hormone et perturbe le fonctionnement normal d'un organisme.

Phtalates : composés chimiques dérivés de l'acide phtalique, couramment utilisés comme plastifiants des matières plastiques, notamment du polychlorure de vinyle (PVC), et incorporés comme fixateurs dans de nombreux produits cosmétiques : vernis à ongles, laques pour cheveux, parfums…

Quelques substances dangereuses dans les eaux des rivières

Des médicaments comme le distilbène® ou le médiator.

Des perturbateurs endocriniens comme le bisphénol A, les parabènes qui ont longtemps été utilisés comme conservateurs dans les cosmétiques et dans l'industrie pharmaceutique, ou encore les phtalates.

Depuis 2005, en France, les perturbateurs endocriniens font l'objet d'une étude toute particulière dans le cadre du PNRPE (programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens) sous la tutelle du ministère de l'Écologie et du Développement durable.

Ces produits gardent la capacité qu'ils avaient en tant que médicaments, à influencer l'organisme, sauf qu'ils le font au hasard et sans contrôle, sans pertinence et sans posologie.

Pollution, écologie et biomarqueurs

Jusqu'ici, on a parlé des dangers des polluants dus à l'activité humaine et leurs répercutions sur la santé publique. Mais ils ont évidemment des effets sur toutes les formes de vie : les plantes et les animaux. Leur

présence va donc modifier la vie (la flore et la faune), dans une région, une forêt, une vallée – tout ce que l'on appelle **un « écosystème ».**

C'est l'écologie qui étudie ce genre de modifications ou de perturbations.

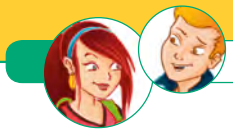
Figure 7

La mer, réservoir de la pollution humaine.

Des études donnent lieu à la **technique des « biomarqueurs »,** basée sur le raisonnement suivant.

Si on surveille un écosystème, en connaissant donc les populations d'espèces vivantes qui l'habitent, et que l'on observe des modifications – les mêmes oiseaux ne viennent plus, les mêmes plantes ne se plaisent plus… – c'est que des modifications de l'environnement sont intervenues. C'est le signe – le « marqueur » – qu'une pollution a eu lieu. Sans détecter de molécule responsable, on a donc là le moyen de dire qu'une ou des molécules étrangères ont fait leur apparition.

La technique, décrite comme on vient de le faire, est encore trop globale. On détecte des modifications, mais on n'est pas dirigé vers l'identification de la cause (disons « de la molécule ») responsable. C'est ce qui conduit à définir les « biomarqueurs » – certains choix de plantes – pour lesquels on sait attribuer la ou les cause(s) des modifications.



L'observation du biomarqueur permet alors une **« recherche ciblée » de la molécule responsable**. Il s'agit ainsi d'éviter de mesurer tout partout et tout le temps ; le biomarqueur permet d'orienter la recherche du « coupable » et de la rendre beaucoup plus efficace.

Conclusion

Malgré les moyens d'identification des molécules polluantes, la compréhension de leurs effets et la réduction de leur présence, beaucoup d'efforts de recherche sont encore à faire pour que la connaissance des molécules présentes dans l'eau et donc dans l'environnement soit complète ; beaucoup d'efforts aussi pour que leurs effets sur la santé humaine et écologiques soient complètement connus.

UNE ENQUÊTE EXPLOSIVE

D'après une conférence de madame Sandrine Pereira Rodrigues, Laboratoire central de la préfecture de police.

Avec Max et Lea, mène l'enquête en utilisant les méthodologies et le fonctionnement d'un laboratoire d'analyse mobile appelé sur le terrain d'une scène de crime. Il s'agit d'un cas fictif mais néanmoins inspiré de faits réels.

Les faits

6H30, un dimanche matin, une forte explosion fait trembler tout un quartier d'une zone pavillonnaire tranquille.

La police, les sapeurs-pompiers et le SAMU sont alertés.

Sécurisation des lieux

Les démineurs du LCPP (Laboratoire central de la préfecture de police) sont appelés et installent un périmètre de sécurité autour du siège de l'explosion : un cabanon situé dans le jardin d'un pavillon (*Figure 1*).

Figure 1

Périmètre de sécurité sur le lieu de l'explosion.

L'enquête commence

Les faits

L'occupant des lieux est retrouvé inanimé sur l'herbe, gravement blessé sur tout le corps notamment le bas-ventre déchiré et présentant des brûlures au niveau des cheveux. Il est en détresse respiratoire, et son avant-bras droit a été arraché.

Il est évacué vers les services hospitaliers.

Les premiers éléments

Identité de l'occupant des lieux

35 ans, célibataire.

Actuellement sans emploi connu, après avoir abandonné des études de chimie.

Taciturne, solitaire, peu de relations avec le voisinage.

Ses proches voisins signalent qu'il effectue de nombreux allers-retours nocturnes depuis la maison vers le cabanon dans lequel il passe beaucoup de temps.

Les services de police visionnent la caméra de vidéosurveillance d'un pavillon voisin.

Figure 2

Reconstitution en terrain d'essai de l'explosion survenue, sur la base des constatations techniques réalisées à partir des images de vidéosurveillance (effets de souffle et thermiques, projections).

Question 1

Quelle hypothèse de base peux-tu formuler pour la suite de l'enquête à partir des images de la *figure 2* ? (5 pts)

- Hypothèse A : incendie explosif.
- Hypothèse B : explosion incendiaire.

Dommages constatés à l'intérieur du cabanon

Question 2

À partir des photos prises par l'équipe d'investigation (*Figure 3*) coche sur le tableau 1, les dommages effectivement constatés dans le cabanon. (1 pt par réponse exacte)

Figure 3

Photos prises dans le cabanon après l'explosion.

Tableau 1 **Dommages constatés dans le cabanon.**

Multitude de petits débris	…
Nombre limité de débris plutôt de grosse taille	…
Projection sur de grande distance	…
Projection sur des distances limitées	…
Cloisons et portes arrachées	…
Cloisons et portes peu déplacées	…
Carbonisation limitée et plutôt localisée	…
Carbonisation étendue	…

Question 3

Pour la suite de l'enquête, privilégies-tu l'hypothèse A, l'hypothèse B ou une troisième hypothèse C : une fuite de gaz naturel ? (5 pts)

.....

Inspection générale des lieux par les démineurs

De très nombreux produits sont retrouvés non seulement dans le cabanon mais aussi dans la maison : dans le sous-sol, la cuisine et la salle de bains.

Des produits emballés facilement identifiables (*Figure 4*) dont certains sont des produits commerciaux et d'autres de laboratoire mais facilement accessibles tels que : acétone, acide sulfurique, eau oxygénée, nitrate, chlorate, engrais.

Figure 4

Photos des différents produits identifiables trouvés dans la maison.

Des produits non identifiés (*Figure 5*) sous formes de poudres de diverses couleurs (blanche, brune…) dans des récipients variés (verrerie de laboratoire, moules à gâteaux, sacs plastiques…) sont retrouvés dans le cabanon.

Dans la cuisine et dans la salle de bains de la maison, on trouve des boîtes contenant de la poudre blanche, des sacs blancs remplis de granulés blancs (sans aucune mention), dans le réfrigérateur des petits ramequins, de la poudre blanche légèrement cristallisée, des blocs de matière souple élastique dont l'aspect évoque des galettes alimentaires, de nombreuses autres poudres suspectes (ocre, rose, blanche, jaune) dans des récipients très divers.

Figure 5

Photos des différents produits non identifiés trouvés dans la maison.

Question 4

Quelles hypothèses semblent pouvoir être éliminées ?

Justifie ta réponse. (2 pts)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Analyse sur le terrain en vue de l'identification des substances trouvées

Par mesure sécuritaire, les démineurs effectuent des prélèvements de quantités infimes des produits qui sont transmis au fur et à mesure au laboratoire mobile qui est positionné en base arrière dans la rue (*Figure 6*).

Figure 6

Laboratoire mobile.

Les experts chimistes des EPI (équipement de protection individuel) prennent en charge les prélèvements (*Figure 7*) pour :

– rechercher à l'aide de détecteurs spécifiques, les dangers éventuels présentés par les produits (radiations, vapeurs toxiques) (*Figure 8*) ;

– puis effectuer des analyses systématiques en vue de leur identification (*Figures 9 et 10*).

Figure 7

Divers kits de prélèvement pour assurer un prélèvement intègre et représentatif.
A) Gaz et vapeurs : pompes, poches en matière souple de un à deux litres et tubes absorbants (charbon actif, gel silice, polymères type Tenax©) ; **B)** liquide et solides : emballage adapté (verre, plastique, étanchéité).
Source : trois dernières photos : Préfecture de police.

Explosimètre (gaz et liquides volatils) Composés inflammables	 *Gazmètre, GMI*
Oxygénomètre	 *Industrial Scientific*
PID : détecteur à photo-ionisation FID : détecteur à ionisation de flamme (gaz et liquides volatils) Composés Organiques Volatils	 *MIniRAE* *SEWERIN*

Figure 8

Différents détecteurs.

Cellules électrochimiques spécifiques (gaz et liquides volatils) monoxyde de carbone CO, ammoniac NH_3, acide cyanhydrique HCN, hydrogène sulfuré H_2S, chlore Cl_2	*Industrial Scientific*
AP4C : photométrie de flamme (gaz et liquides) Phosphore, Soufre, Arsenic, Composés azotés, Composés Organiques Volatils (gaz et liquides)	*Proengin*
Bandelettes colorimétriques spécifiques et papier pH (ions dans liquides ou solides solubilisables)	
Tubes colorimétriques spécifiques (gaz et liquides volatils) jusqu'à 34 composés	*Draeger*

Figure 9

Détecteurs mis en œuvre sur le terrain pour retrouver la famille du produit chimique.

Spectrométrie Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) (liquides et solides) – (gaz et liquides volatils)	Smiths detection Gasmet
Spectrométrie de fluorescence X dispersif énergie (liquides et solides)	Bruker
Spectrométrie Raman (liquides et solides)	AHURA
Chromatographie en phase gazeuse couplée à de la spectrométrie de masse (CPG/SM) (gaz et liquides volatils)	Inficon Bruker

Figure 10

Exemples de matériels couramment utilisés par le laboratoire mobile.

Analyse de la poudre brune retrouvée dans le plat de cuisson en terre cuite de la figure 5

Aspect : mélange de particules de couleurs blanche et jaune comme de la cassonade.

Choix du matériel d'analyse : spectrométrie de fluorescence X (SFX), spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), spectrométrie Raman.

Question 5

Est-ce le bon choix ? Justifie ta réponse. (3 pts)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Analyses : l'analyse (SFX) permet d'identifier les atomes présents dans un mélange de matières organiques (à base de carbone, hydrogène, oxygène) : on identifie, ici, la présence massive de chlore (Cl) et de sodium (Na).

Remarque

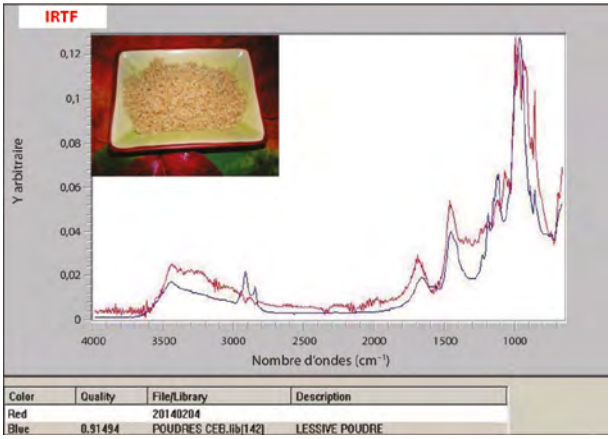
Le chlorate de sodium $NaClO_3$ est un explosif.

Les spectres SFX, Raman et IRTF du chlorate de sodium sont représentés par les courbes noires sur les *figures 11 A, B et C*.

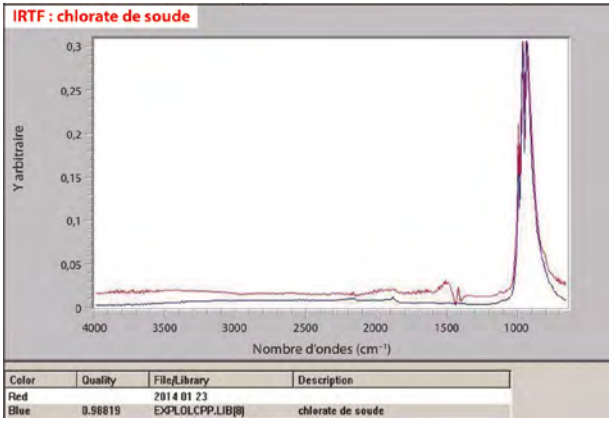
Les spectres SFX, Raman et IRTF de la poudre brune sont représentés par les courbes rouges sur les *figures 11 A, B et C*.

Si on fait un tri dans la poudre brune pour éliminer le maximum de particules blanches du mélange, on obtient trois spectres semblables aux courbes noires des *figures 11*.

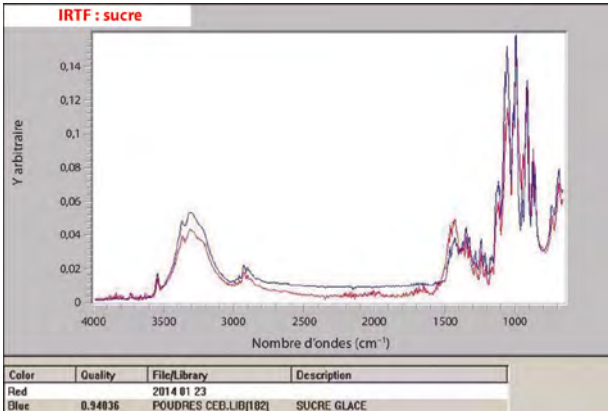
Si on mélange du chlorate de sodium avec du sucre, on obtient pour ce mélange, les trois spectres rouges de la *figure 11*.



A



B



C

Figure 11

Résultats des analyses spectrométriques du mélange de la poudre brune :
A) spectre de fluorescence X ;
B) spectre Raman ;
C) spectre IRFT de la poudre brune.

Question 6

De quoi est constituée la poudre brune ? (5 pts)

.....

.....

.....

.....

.....

Analyse des prélèvements réalisés sur les blocs de matière souple ressemblant à de la galette alimentaire

Remarque

La présence sur le lieu de l'explosion de chlorate de sodium, et la puissance de l'explosion font soupçonner la présence d'un explosif artisanal classique tel que le TATP (peroxyde d'acétone).

L'analyse par SFX indique que ces blocs ne contiennent que de la matière organique (carbone, hydrogène oxygène, ou azote).

Les spectres IR et Raman du TATP sont comparés à ceux des échantillons prélevés sur les galettes (*Figure 12*).

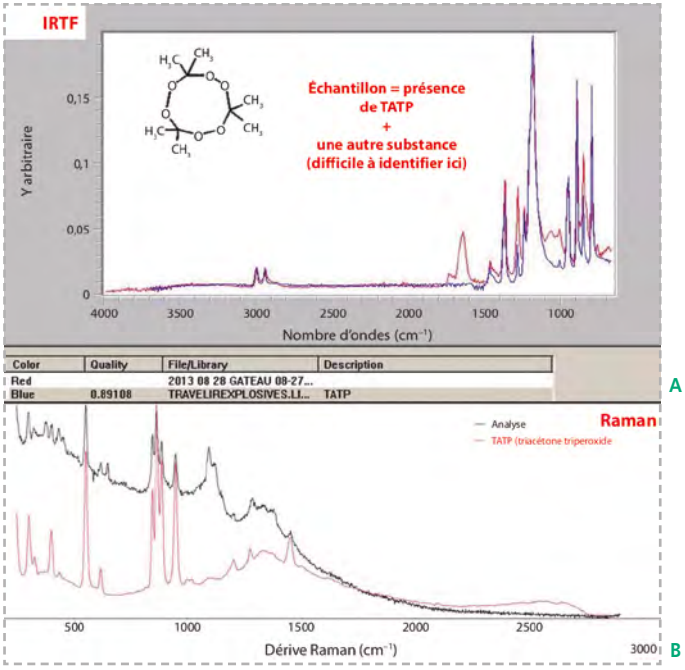


Figure 12

Analyse sur le terrain de la galette :
A) spectre IRFT ;
B) spectre Raman.

Question 7

Que contient la galette ? Justifie ta réponse. (3 pts)

.....

.....

.....

.....

.....

Remarque

Le TATP est une poudre blanche alors que la galette présente un aspect jaune clair et une consistance élastique : il faut donc poursuivre l'enquête.

Analyse du reste des prélèvements des nombreuses poudres suspectes

Rien ne permet à l'œil nu d'établir la nature chimique des nombreuses poudres suspectes. Par mesure de sécurité, l'analyse sur le terrain est donc indispensable avant tout déplacement des produits.

De nombreuses substances sont identifiées (*Figure 13*).

Figure 13

Identification des substances retrouvées sur le lien de l'explosion.

Des explosifs sensibles et puissants sont présents parmi les produits retrouvés. Leur état est inconnu et il convient de les neutraliser avant tout déplacement.

Remarque

Le PETN connu sous le nom de pentrite est un explosif très puissant, plus sensible aux chocs ou à la friction que le TNT. Il est utilisé dans les cordeaux détonants pour les mines ou les carrières.

Fin de l'intervention sur le terrain : neutralisation et évacuation des produits dangereux

Les différents types d'explosifs sont neutralisés sur le site par les démineurs par solubilisation dans un solvant adapté afin de permettre le transport jusqu'à un site où ils seront détruits (*Figure 14*).

Les produits chimiques non sensibles sont évacués de manière classique et des prélèvements conservatoires constitués sur chacun.

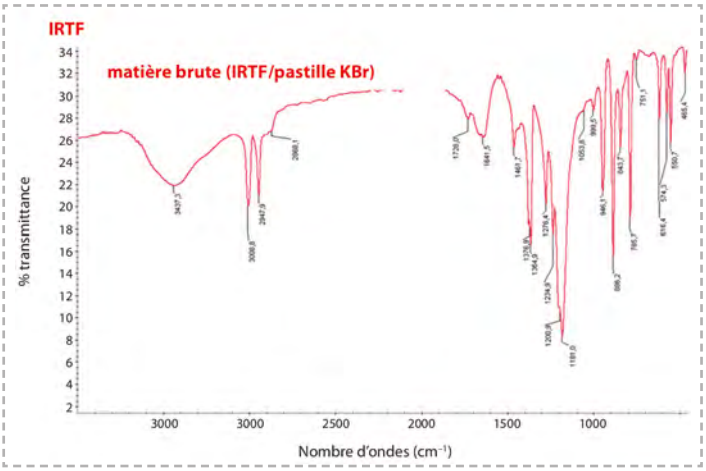
Figure 14

La fin de l'intervention :
A) démineur du LCPP en tenue lourde EOD ;
B) TATP en cours de neutralisation ;
C) neutralisation du TATP sur site par solubilisation ;
D) évacuation des produits chimiques après constitution de prélèvements conservatoires.

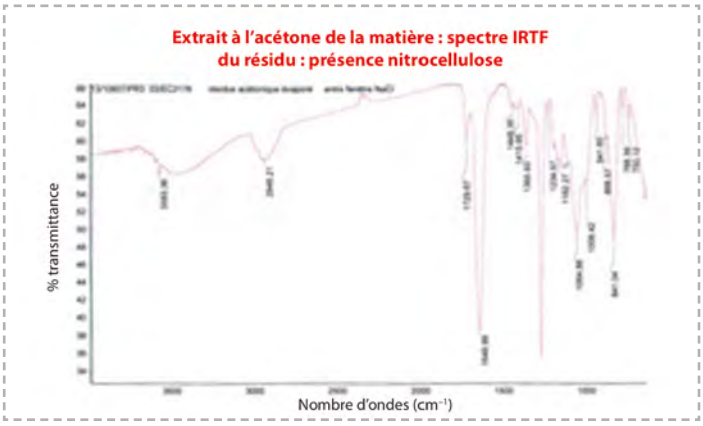
Analyse des prélèvements de galette au laboratoire d'analyse de la préfecture de police (LCPP)

Le TATP est extrait sélectivement des échantillons de galette par traitement à l'acétone.

Les spectres IRTF des échantillons de galette avant et après extraction du TATP sont comparés (*Figure 15*).



A



B

Figure 15

Analyse de la galette en laboratoire : A) spectre IRFT de la matière brute ; B) spectre IRFT du résidu obtenu après extraction du TATP présent.

Par comparaison avec une banque de données, le spectre de l'échantillon B est identifié à celui de la nitrocellulose.

Question 8

Quelle est la composition des galettes ? (3 pts)

.....

.....

.....

.....

.....

Remarque

La nitrocellulose est connue pour réduire la sensibilité du TATP.

Conclusion de l'enquête

L'occupant des lieux sera mis en examen et emprisonné dès sa sortie de l'hôpital.

Question 9

Pourquoi ? Justifie ta réponse par une liste de preuves. (3pts)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

D'après l'article L2353-4 modifié par la loi n° 2005-1550 du 12 décembre 2005 – art.12 JORF 13 décembre 2015 sont punies d'un emprisonnement de cinq ans et d'une amende de 3 750 € :

1. la fabrication sans autorisation d'un engin explosif ou incendiaire ou d'un produit explosif, quelle que soit sa composition ;

2. la fabrication de tout autre élément ou substance destiné à entrer dans la composition d'un produit explosif.

Les peines sont portées à dix ans d'emprisonnement et à 500 000 € d'amende lorsque l'infraction est commise en bande organisée.

Le projet de loi présenté en juillet 2014 vise à renforcer l'arsenal juridique français dans la lutte contre les actes antiterroristes par le renforcement du code pénal en prenant en compte l'interdiction de diffusion de procédés permettant la fabrication d'engins explosifs et la notion d'entreprise terroriste individuelle.

Corrigé

Q1 : Il s'agit d'une explosion ayant entraîné un incendie, donc l'hypothèse B est exacte.

Q2 : On voit des Multitude de petits débris/ Projection sur des distances limitées/ Cloisons et portes arrachées/ Carbonisation limitée plutôt localisée

Q3 : Il faut privilégier l'hypothèse B.

Q4 : L'explosion accidentelle semble devoir être éliminée car les différents produits trouvés dans les lieux témoignent de la présence d'un laboratoire improvisé.

Q5 : C'est en effet un bon choix car les trois techniques servent à identifier les liquides et les solides.

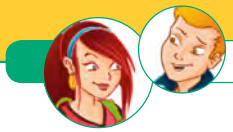
Q6 : La poudre brune est constituée d'un mélange de chlorate de sodium et de sucre.

Q7 : La galette contient du TATP + une autre substance difficile à identifier, en effet, on peut noter la présence de toutes les bandes IR et Raman du TATP.

Q8 : Les galettes sont composées de TATP + nitrocellulose et ce, afin de réduire la sensibilité de l'explosif lors de sa manipulation.

Q9 : De nombreuses traces d'explosifs puissants et sensibles ont été retrouvées un peu partout dans la maison, dans des récipients de nature très diverse qui témoignent d'un laboratoire de fabrication artisanale d'explosifs donc d'une activité terroriste.

Si tu as plus de 25 points, tu es un brillant enquêteur et tu pourras peut-être plus tard travailler dans la police scientifique. Lis attentivement le chapitre suivant.



UNE ENQUÊTE APRÈS ACCIDENT INDUSTRIEL

D'après les conférences de Pierre Toulhoat et François Fontaine (INERIS)

L'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) est à la disposition des pouvoirs publics en cas de situation d'urgence, après un accident industriel ou de transport de matière dangereuse, grâce à une cellule d'appui mobilisée 24 h/24 pour aider les pouvoirs publics et les services de secours à comprendre et à évaluer les impacts. Dans les cas où des produits toxiques ou nocifs sont dispersés, il faut aller très vite afin de déceler les sources de contamination et les neutraliser.

Voici deux exemples d'enquête.

Remarque

L'INERIS travaille en liaison avec les laboratoires de la police technique et scientifique qui doivent déterminer les responsabilités et dans certains cas avec le réseau d'intervenants en situation post-accidentelle (RIPA) publics et privés.

Les effets de la pollution sur les poissons de la rivière Dore

Les faits

Dans une rivière tranquille du Massif central, en aval d'une installation industrielle, les pêcheurs observent :

– que les poissons femelles ne pondent plus et que leurs glandes sexuelles sont hypertrophiées ;

– l'apparition d'intersexualité chez les poissons mâles avec la présence d'ovocytes dans leurs glandes sexuelles.

Question 1

Quelle est, à ton avis, la cause biologique probable de ce désordre ?

.....

.....

.....

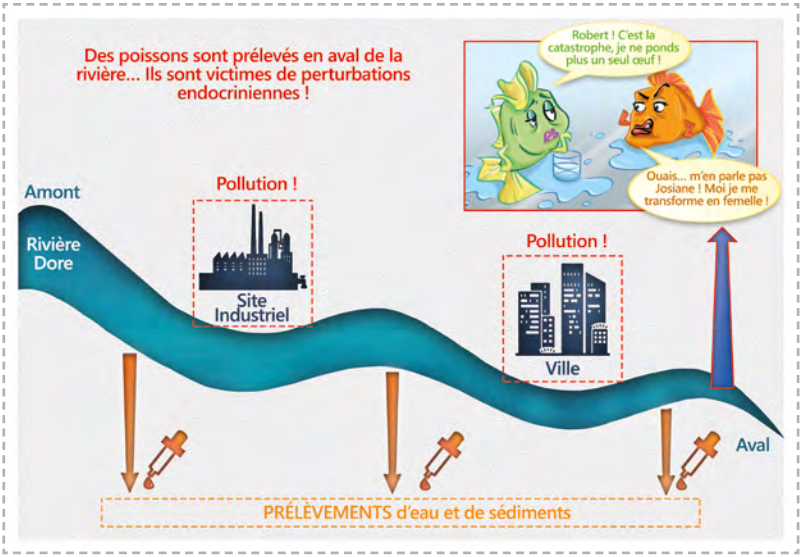


Figure 1

Les effets de la pollution sur les poissons de la rivière Dore.

L'investigation

Il faut constituer une équipe de biologistes et de chimistes pour analyser les prélèvements d'eau et de sédiments réalisés en amont et en aval de l'installation industrielle (*Figure 1*).

Il faut trouver les molécules responsables de ces perturbations endocriniennes.

Un ***perturbateur endocrinien*** est une molécule qui mime, bloque ou modifie l'action d'une hormone et perturbe le fonctionnement normal d'un organisme.

Question 2

Qui a réalisé les tests du tableau 1, les biologistes ou les chimistes ?

.....

.....

.....

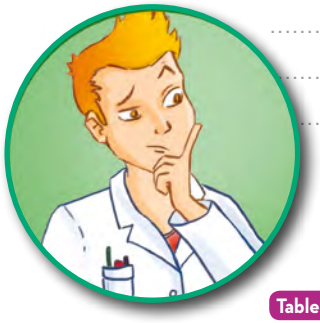


Tableau 1 **Résultats des différents tests réalisés sur les prélèvements en amont et en aval de l'installation industrielle.**

		R aux œstrogènes	Hydrocarbures polycycliques aromatiques	R aux composés d'origine stéroïdienne
Sédiments	Amont	±	+	-
	Aval 1	±	+	-
	Aval 2	±	+	-
Eau	Amont	±	±	-
	Aval1	±	±	***
	Aval 2	±	±	***

R = Récepteur moléculaire détectant la présence des molécules de ce type.

- Présence non détectée. ± Faible concentration. + Présence détectée.

*** Contamination importante.

Stéroïdes : ce terme en médecine fait référence aux hormones stéroïdiennes qui ont des propriétés virilisantes.

Œstrogènes : groupe de stéroïdes dont la fonction à l'état naturel est d'être une hormone sexuelle de la femme.

La contamination d'origine stéroïdienne est associée à la présence de composés pharmaceutiques perturbateurs endocriniens.

Identification des polluants

Dans chaque prélèvement, les molécules sont séparées par chromatographie en phase liquide puis identifiées par spectrométrie de masse à haute résolution.

Question 3

Qui fait ce travail d'identification, les biologistes ou les chimistes ?

.....

.....

Les molécules identifiées en quantité importante sont des corticoïdes et des glucocorticoïdes connus d'un certain nombre de chimistes et de pharmaciens comme des produits entrant dans la composition de médicaments.

Question 4

a. Qu'en déduis-tu ?

.....

.....

b. Que s'est-il vraisemblablement passé et que faut-il faire ?

.....

.....

HPLC et spectrométrie de masse

La chromatographie en phase liquide (HPLC) (*Figure 2*) et la spectrométrie de masse (*Figure 3*) sont toutes deux des méthodes utilisées pour trier les différentes espèces moléculaires présentes dans un mélange. On va ainsi forcer toutes les molécules à effectuer un parcours commun parsemé d'obstacles : certaines espèces le franchiront aisément, d'autres auront plus de difficultés. À l'arrivée, il y aura un échelonnement qui permettra de les détecter séparément.

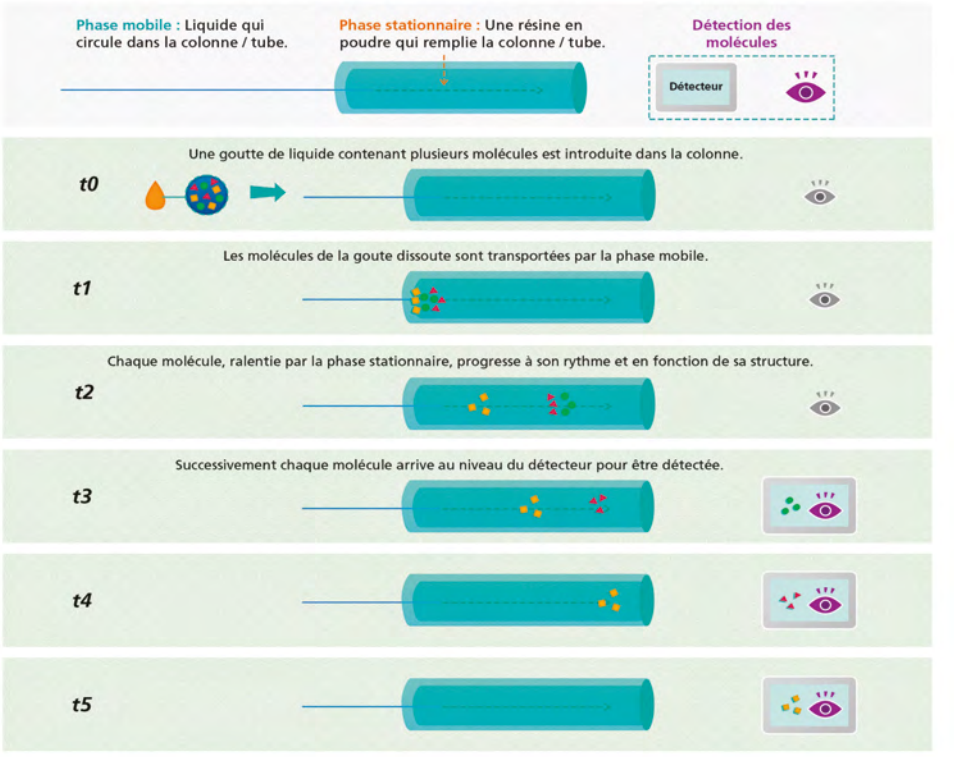


Figure 2

Schéma du principe de la chromatographie en phase liquide.

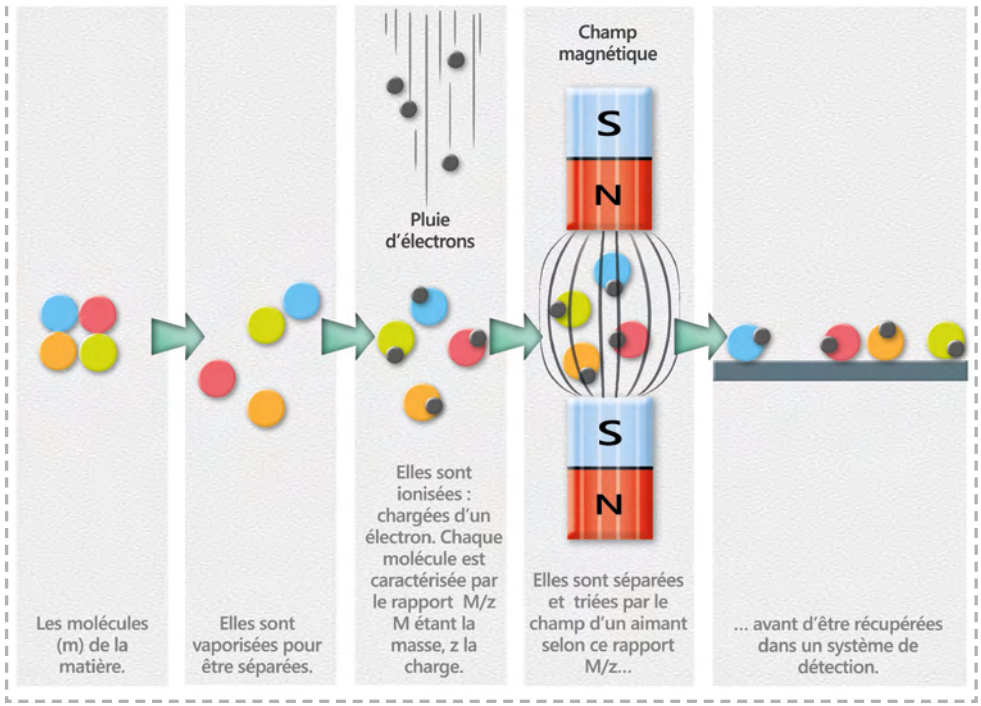


Figure 3

Schéma du principe de la séparation par spectrométrie de masse des molécules contenues dans un mélange.

L'incendie explosif d'un hangar agricole

Figure 4

Le hangar agricole, avant, pendant et après un incendie suivi d'une explosion.

Les faits

L'incendie suivi de l'explosion d'un hangar agricole a entraîné l'effondrement de plafonds dans le village voisin dans un rayon de 200 mètres.

Des débris de poutres métalliques ont été retrouvés jusqu'à environ 500 mètres du lieu.

Les dégâts de l'incendie étaient mêlés à ceux de l'explosion.

Remarque

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques.

IRCGN : Institut de recherche criminelle de la Gendarmerie nationale.

INPS : Institut national de la police scientifique.

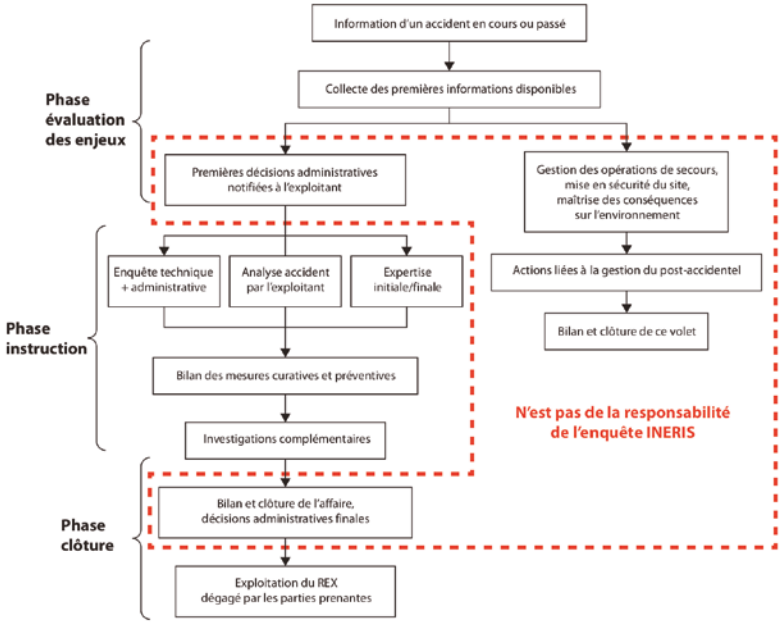


Figure 5

Les étapes de l'enquête technique après un accident industriel.

L'enquête est partagée sur le terrain entre les laboratoires de la police technique et scientifique (IRCGN et INPS).

Les étapes de l'enquête technique, et la part confiée à l'INERIS, sont résumées sur la *figure 5*.

Les actions à mener lors de la première visite sur les lieux sont résumées dans l'encart « Les actions à mener lors de la première visite ».

Les méthodes de travail en partenariat sont bien établies et suivent des protocoles précis.

Remarque

Attention, l'enquête technique ne doit pas perturber l'enquête judiciaire : ne pas faire des prélèvements faisant fi de ce qui pourrait intéresser la police scientifique et technique par exemple sans prendre en compte les possibilités des empreintes ou de l'ADN.

Les actions à mener lors de la première visite

Identifier les faits et les preuves judiciaires
- Conséquences (dommages matériels, effets sur l'Homme, effets sur l'environnement)
- Photos
- Vidéos (intérêt des téléphones mobiles)

Recueillir les preuves non pérennes

Collecter les données
- L'entreprise (organisation…)
- Le site (production, procédés, produits…)
- Les installations (conduite, enregistrements des procédés, équipements, maintenance…)

Recueillir les témoignages « à chaud » (entretiens ouverts, entretiens ciblés)
- Description des faits
- Déroulement de l'accident
- Signaux précurseurs

Collecter des échantillons
- Matières premières
- Produits finis
- Matériaux affectés par l'accident, résidus de combustion, dépôts de pulvérulents, liquides toxiques…

Analyse des dommages

Une cartographie des dommages est réalisée sur place à partir de photographies prises dans le hangar après l'accident (*Figure 6*).

Figure 6

Cartographie des dommages.

Une analyse quantitative des dommages est effectuée en prenant en compte la résistance des différents types de matériaux, et en comparant à des modèles répertoriés d'accidents du même type.

L'analyse des effets toxiques est difficile si on manque de connaissances sur la nature et les quantités de produits mises en œuvre.

Recherche de l'origine de l'explosion

Une ***table de corrélation*** permet d'étudier les dépendances ou les associations entre plusieurs variables.

→ À partir de photos, les dégâts liés à l'explosion sont positionnés sur une carte.

→ On utilise des tables de corrélation développées par l'US-Army qui associent des types de dégâts à des masses de TNT, donc à des surpressions.

→ Des abaques donnent l'évolution de la surpression estimée en fonction de la distance à l'épicentre de l'explosion.

→ On peut alors positionner sur la carte, l'origine de l'explosion (*figure 7*).

Un ***abaque*** est un dispositif utilisé pour des calculs mathématiques.

TNT : trinitrotoluène, dérivé trois fois nitré du toluène, employé comme explosif brisant.

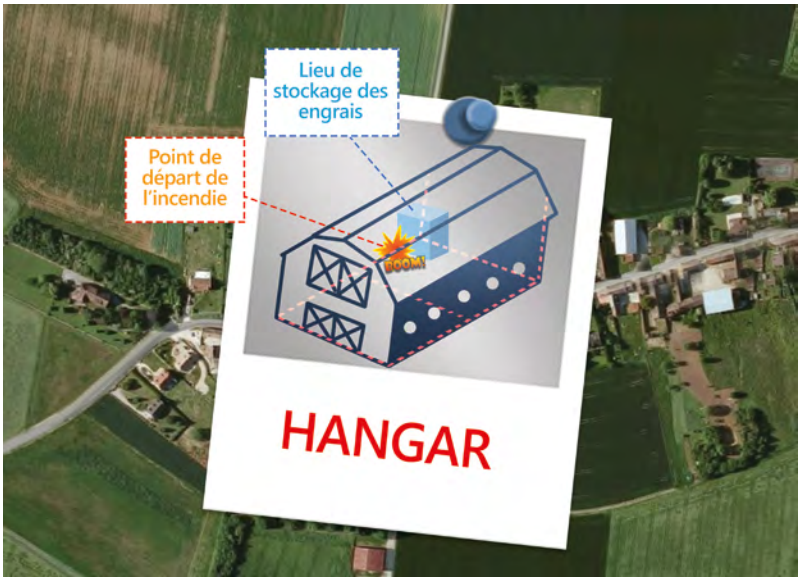


Figure 7

Recherche de l'origine de l'explosion.

Question 5

Où localises-tu l'explosion, quel est le produit à l'origine de l'explosion ?

.....

.....

.....

Analyse des échantillons

Il faut examiner les caractéristiques physico-chimiques des produits présents dans le hangar :
– dans quelles conditions peuvent-ils exploser ?
– à quelle température peuvent-ils s'enflammer ?

Le principal composant de l'engrais présent et utilisé est du nitrate d'ammonium.

Remarque

Le nitrate d'ammonium (s'il n'est pas mélangé à du fioul) n'est pas explosif. En revanche, il explose très facilement quand il est à l'état fondu à partir de 170 °C.

Question 6

Quelle conclusion proposes-tu pour le rapport final de ton enquête ?

Conclusion

Il faut rester très humble dans les enquêtes techniques sur les accidents. Le nitrate d'ammonium est un bon exemple.
On a découvert, en 1921, que ce produit utilisé couramment comme engrais et apparemment sans danger, pouvait dans certaines conditions exceptionnelles conduire à des drames. Un tas de 500 tonnes de nitrate d'ammonium était pris en masse. On a essayé de le désagréger avec un bâton de dynamite, et tout explosa entraînant le décès de 600 personnes.
L'enquête très longue de la terrible explosion d'AZF à Toulouse, en 2001, a montré que c'est la présence accidentelle de produits chlorés pour piscine à côté du nitrate d'ammonium qui étaient vraisemblablement à l'origine de cet accident.
On voit que la connaissance sur les dangers industriels évolue continuellement, que les retours d'expérience sont très importants pour les prévenir et pouvoir donner des consignes de sécurité mais il reste encore beaucoup de progrès à faire pour limiter au maximum les dommages humains et écologiques.

Corrigé

Q1 : Ces perturbations sont dues à une pollution d'origine industrielle.

Q2 : Ce sont les biologistes qui ont réalisé ces tests.

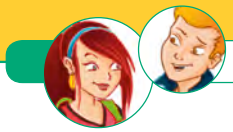
Q3 : Ce travail d'identification est réalisé par les chimistes.

Q4 : a- Les médicaments sont probablement fabriqués dans l'usine en amont de la rivière. Il faudra le vérifier avec une enquête plus approfondie au sein de l'usine. **b-** Cette usine a eu un défaut de conception ou de maintenance des systèmes de gestion de ses effluents contenant ces composés actifs qui ont été rejetés dans la rivière. Il faut demander à l'industriel de prendre les mesures nécessaires pour éviter cette pollution et vérifier ensuite le résultat.

Q5 : L'explosion a eu lieu dans le hangar, à proximité du stockage des engrais. Les engrais sont à l'origine de l'explosion.

Q6 : Il y a eu un court-circuit qui a déclenché un début d'incendie. Sous l'effet de l'élévation de température de l'incendie, le nitrate d'ammonium contenu dans les engrais a explosé.

1 point par bonne réponse. Si tu dépasses 7/10, tu es un excellent enquêteur.
Lis attentivement le chapitre suivant, tu y découvriras peut-être ton futur métier



LES CHIMISTES AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ DES PERSONNES, DES BIENS, DE LA SANTÉ ET DE L'ENVIRONNEMENT

Ces chimistes travaillent partout : dans les agences, instituts et organismes de recherche nationaux et internationaux, dans des laboratoires d'expertise privés et dans pratiquement toutes les entreprises de la chimie et de tous les secteurs industriels irrigués par la chimie.

Les sciences de la chimie concernées

Dans les différents chapitres de cet ouvrage, il est souvent question de **chimie analytique**, que ce soit pour les sciences criminelles, la mise en évidence de contrefaçons, la détection des contaminants, la mesure des expositions.

Mais c'est aussi prévoir et évaluer les risques, **concevoir des produits et des procédés non polluants**, étudier le devenir des contaminants

et développer une chimie de l'environnement, on parlera de **toxicologie, d'écotoxicologie** et de **chimie environnementale.**

Les **métiers** dans ces différents domaines sont accessibles au niveau :
– bac+3, technicien ;
– bac+5, ingénieur et chercheur ;
– bac+8, docteur.

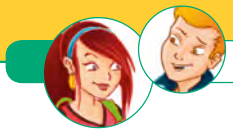
Fiches métiers (jointes en annexe) :
– responsable de laboratoire d'analyse/contrôle qualité ;
– ingénieur hygiène sécurité environnement ;
– technicien d'analyse ;
– technicien environnement ;
– responsable/directeur des affaires règlementaires ;
– spécialiste/attaché des affaires règlementaires.

Les domaines d'application

Les sciences criminelles

Elles s'appuient sur la chimie analytique et s'appliquent :
– aux expertises de la police scientifique ;
– à la lutte contre le terrorisme ;
– à la recherche de stupéfiants.

Les emplois correspondants sont majoritairement localisés dans les laboratoires de recherche de :
– l'INPS (Institut national de la police scientifique) ;
– l'IRCGN (Institut de recherche criminelle de la Gendarmerie nationale). S'y rattachent les techniciens d'investigation criminelle de proximité (TIC) et les personnes qui travaillent sur les plateaux criminalistiques au niveau départemental ;
– LCPP (Laboratoire central de la préfecture de police de Paris).



La détection des fraudes

Les expertises sont réalisées par des laboratoires publics et privés et par l'**ANSES** (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation et de l'environnement et du travail).

Prévention et évaluation des risques, détection, traitement des contaminants

Toutes ces applications font partie des missions des agences et organismes officiels en charge du respect de la règlementation nationale et européenne :

– l'INERIS (Institut national de l'environnement et des risques) qui réalise ou fait réaliser des études et des recherches permettant de prévenir les risques que les activités industrielles et économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens ainsi que sur l'environnement.
– L'INERIS agit aussi en situation d'urgence pour aider les pouvoirs publics à comprendre et évaluer les impacts ;
– l'ANSES qui a une mission de recherche, d'évaluation des risques et des bénéfices sanitaires ;
– l'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et techniques pour l'environnement et l'agriculture) ;
– l'ECHA (Agence européenne des produits chimiques).

Mais aussi de celles des :

– laboratoires d'universités, d'écoles d'ingénieurs, de grands organismes de recherche (CNRS, INRA, IFREMER) ;
– entreprises spécialisées dans l'environnement, le traitement des eaux, le traitement et le recyclage des déchets.

Par ailleurs la mise en place de la directive REACH a eu pour conséquence la mise en œuvre d'un système d'évaluation des procédés, des produits, des cycles de vie dans un objectif de protection sanitaire et environnementale dans toutes les entreprises avec création des emplois nécessaires.

LES FICHES MÉTIER

Animateur hygiène sécurité environnement (HSE) (H/F)

Au quotidien :

- Participe à l'identification des risques professionnels et met en œuvre des actions permettant de les minimiser.
  Les risques concernant l'hygiène, la sécurité et l'environnement sont de différentes natures : accidents du travail, maladies professionnelles, risques de pollution, nuisances de différents types dont nuisances sonores.
- Sensibilise, forme, convainc l'ensemble du personnel d'une entreprise.
- Contrôle l'application de ces règles sur la base d'un plan de prévention qu'il (elle) aura contribué à élaborer en cohérence avec la base de la réglementation en vigueur.
- Participe également à la préparation de plans d'intervention et est en première ligne en cas d'incident ou d'accident.
- Est consulté(e) lors de la mise en place de nouvelles installations.

Qualités requises

- Compétences scientifiques, techniques et juridiques.
- Savoir faire preuve d'anticipation, de pédagogie, de capacité de conviction, de sang-froid, de réactivité et de rigueur.

Lieu de travail

- En interne avec l'ensemble des équipes de l'entreprise et en externe avec les pompiers, la sécurité civile, la gendarmerie, le milieu médical et l'inspection du travail.
- En interne, il (elle) collabore tout particulièrement avec les équipes de R&D, procédés, production et analyse.

Salaire mensuel moyen

- 1 700 à 2 000 €.

Quelle formation

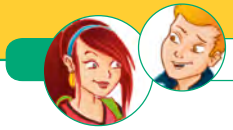
- Bac+2 (BTS chimie, bio analyse et contrôle ou un DUT chimie, génie biologique).
- Bac+3 (licence professionnelle avec enseignement en chimie, analyse et environnement).
- Certaines de ces formations peuvent exister à la fois en formation initiale et/ou en formation en alternance.

Et après

- Avec formation complémentaire, possibilité de prise de responsabilités dans le domaine de l'hygiène, la sécurité et l'environnement.

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie la fiche détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/animateur-hygiène-sécurité-environnement-hse-hf



Spécialiste/attaché affaires réglementaires (H/F)

Au quotidien :
- Le (la) spécialiste ou attaché(e) affaires réglementaires a la responsabilité de mettre en œuvre les actions permettant de garantir la conformité réglementaire des produits de l'entreprise.
- Est en charge de la constitution et la rédaction du dossier réglementaire ou dossier d'homologation REACH.
- Assure le dépôt auprès des autorités réglementaires et le suivi des étapes d'enregistrement.
- Prépare l'ensemble des éléments permettant d'assurer le renouvellement des autorisations de commercialisation pour un produit.

Qualités requises

- Avoir une double compétence, scientifique dans le domaine considéré et juridique afin de maîtriser l'ensemble des aspects réglementaires.
- Organisation.
- Rigueur.
- Négociation.
- Rédaction.

Lieu de travail

- Au sein d'une entreprise (c'est le cas pour les grandes entreprises), dans un cabinet externe ou dans un organisme de réglementation.

Salaire mensuel moyen

- Débutant Bac+5 + formation juridique 2 400-2 900 €.

Quelle formation ?

- Bac+5 (ingénieur, master ou doctorat dans le domaine scientifique considéré + formation juridique).

Et après ?

- Vocation dans les entreprises de taille suffisante à prendre plus de responsabilités et animer une équipe de spécialistes en qualité de responsable/directeur.

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie la fiche détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/specialiste-attache-affaire-reglementaire-hf

Ingénieur de recherche, chercheur (H/F)

Au quotidien :
- Imagine et met en œuvre des nouvelles molécules ou des nouveaux matériaux, pour obtenir de nouvelles propriétés et de nouvelles applications.
- S'informe de toute nouvelle innovation dans son domaine d'activité.
- Est confronté(e) au quotidien à des technologies de pointe.
- Analyse les résultats obtenus et imagine des améliorations.
- Peut animer une petite équipe de techniciens.

Qualités requises

- Créativité.
- Persévérance.
- Avoir des capacités de synthèse et d'analyse.
- Être habile au sens expérimental.
- Être capable d'animer une équipe.
- Être ouvert(e) aux autres disciplines telles que la physique, la biologie, les biotechnologies…
- La maîtrise de l'anglais est indispensable.

Lieux de travail

- Activité exercée dans les laboratoires de recherche d'entreprises privées ou dans des laboratoires publiques dans de très nombreux secteurs d'activité, de la très petite entreprise à la très grande.

Salaire mensuel moyen

- Débutant Bac+5 : 2 200-2 500 €.
- Débutant Bac+8 : 2 400-2 900 €.

Quelle formation ?

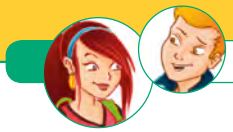
- Titulaire d'un diplôme d'ingénieur, d'un master recherche ou d'un doctorat.
- Le métier s'exerce généralement dès la sortie de l'école ou de l'université.

Et après

- Pour celui (celle) souhaitant continuer son activité en recherche, il (elle) a vocation à prendre plus de responsabilités vers par exemple, des métiers de responsable d'équipes de recherche/chef de projet, directeur(rice) R&D.
- Mais il (elle) pourra aussi évoluer vers les métiers des procédés, de la production industrielle, du commercial.

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie, la fiche métier détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/ingénieur-de-recherche-chercheur-hf



Responsable de laboratoire d'analyses/contrôle qualité (H/F)

Au quotidien
- Expert(e) en analyse, il (elle) dirige une équipe capable de caractériser un produit au plan de sa structure, mesurer sa pureté, contrôler sa stabilité ou suivre l'évolution d'une réaction chimique.
- Adapte les techniques à mettre en œuvre.
- Anime une équipe de techniciens.
- Poste à l'interface des équipes de chimie et d'assurance qualité.

Qualités requises

- Posséder des connaissances approfondies en chimie et dans les différentes techniques d'analyse.
- Faire preuve de qualités de manager, d'une grande rigueur, de capacités d'analyse et avoir le sens des délais.

Lieux de travail

- Présent en R&D (recherche et développement), en procédés, en production et en analyse, ou dans la recherche publique.
- Présent dans de très nombreux secteurs d'activité : chimie, cosmétique, peinture, colle, matériaux, agrochimie, verre, élastomère, pharmacie, énergie, nucléaire, automobile, aéronautique, environnement.

Salaire mensuel moyen

- Débutant : 2 200-2 500 €.

Quelle formation ?

- Plusieurs années d'expérience sont nécessaires avant d'occuper un tel poste.
- Il faut posséder au minimum, un titre d'ingénieur chimiste ou master chimie/analyse, (Bac+5).

Et après

- Évolution possible jusqu'à la responsabilité de l'ensemble des activités d'analyse ou vers d'autres domaines tels que l'assurance qualité et les affaires réglementaires.

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie, la fiche métier détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/responsable-de-laboratoire-d'analyses-contrôle-qualité-hf

Responsable/ingénieur hygiène sécurité environnement (H/F)

Au quotidien

- Garantit au sein de l'entreprise, le respect de l'application des règles en matière d'hygiène, de sécurité et de protection de l'environnement.
- Évalue les risques inhérents à l'activité de l'entreprise et propose une politique de prévention et d'intervention à sa direction générale.
- Définit des actions et pilote leur mise en place en ce qui concerne l'hygiène, la sécurité et la protection de l'environnement (protection des personnes et des installations, pollution de l'air et de l'eau, nuisances sonores, traitement des déchets).
- Contrôle à tous les niveaux la prise en compte de ces actions sur le terrain.
- Organise l'information et la formation du personnel.
- En cas d'incident ou d'accident, coordonne les différentes actions à mettre en œuvre.

Qualités requises

- Compétences multiples : scientifiques, techniques, économiques, en droit et réglementation de l'environnement.
- Être un(e) excellent(e) communicant(e) et un(e) bon(ne) pédagogue avec une forte capacité à convaincre, être très réactif(ve) et savoir prendre des décisions.
- Avoir une très bonne connaissance du site, de ses équipements et de ses produits.
- Savoir animer une équipe de techniciens.
- Savoir interagir avec l'ensemble des secteurs de l'entreprise et avec les autorités extérieures concernées : les pompiers, la sécurité civile, la gendarmerie, le milieu médical, l'inspection du travail, DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement)...

Lieu de travail

- Activité exercée dans les domaines de la recherche et développement, des procédés, de la production, de l'analyse.

Salaire mensuel moyen

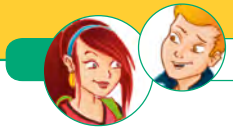
- Débutant Bac+5 : 2 200-2 500 €.
- Débutant Bac+8 : 2 400-2 900 €.

Quelle formation ?

- Titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou d'un master professionnel ou d'une thèse de doctorat en chimie, environnement, sécurité…

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie la fiche métier détaillée : http://mediachimie.org/fichemetier/responsable-ingenieur-hygiene-securite-environnement-hf



Technicien d'analyse chimie/ physico-chimie (H/F)

Au quotidien

- Au moyen de techniques d'analyses appropriées, pilotées par ordinateur, il (elle) caractérise un produit au plan de la structure, mesure sa pureté et sa concentration, contrôle sa stabilité ou suit l'évolution d'une réaction chimique.
- Peut être amené(e) à mettre au point de nouveaux protocoles d'analyse.
- Participe à la maintenance et au réglage de ses équipements.

Qualités requises

- Doit faire preuve d'une très grande rigueur, posséder une bonne capacité d'analyse et savoir travailler en équipe.
- Doit s'adapter à l'évolution rapide des techniques d'analyse.

Lieux de travail

- Il (elle) travaille au sein d'un laboratoire, en collaboration étroite avec les équipes de chimistes en R&D, en procédés et en production.
- Métier présent dans de nombreux secteurs d'activités : chimie, cosmétique, peinture, adhésif, matériaux, agrochimie, verre, plasturgie, élastomère, pharmacie, énergie, automobile, aéronautique, nucléaire, environnement.

Salaire mensuel moyen

- Débutant : 1 400-1 700 €.

Quelle formation ?

- Bac+2 (BTS ou DUT chimie ou mesures physiques).
- Bac+3 (licence professionnelle chimie ou mesures physiques).

Et après

- Après plusieurs années d'expérience et accompagné(e) par une formation adaptée, il (elle) peut évoluer vers un poste de responsable d'équipe d'analyse ou vers d'autres domaines tels que les métiers du commercial ou de l'environnement.

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie, la fiche métier détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/technicien-d%E2%80%99analyse-chimie-physico-chimie-hf

Technicien assurance qualité (H/F)

Au quotidien :
• Conseille, accompagne et met en œuvre des règles de qualité en vigueur au sein de l'entreprise. Les fournisseurs de l'entreprise sont aussi concernés.
• L'audit et la formation à la qualité peuvent faire partie de ses missions.

Qualités requises

- Compétences en chimie et/ou en gestion de la qualité.
- Bonne connaissance de la règlementation.
- Grande rigueur.
- Bonne communication.
- Être pédagogue et persuasif(ve).

Lieux de travail

- Principalement au sein des laboratoires de recherche, des ateliers de procédés ou de production. Dans ces différents lieux, il (elle) travaille auprès de tous les collaborateurs de l'entreprise.
- Présent dans de très nombreux secteurs d'activité : chimie, cosmétique, peinture, colle, matériaux, agrochimie, verre, élastomère, pharmacie, énergie, nucléaire, automobile, aéronautique, environnement.

Salaire mensuel moyen

- Débutant : 1 400-1 700 €.

Quelle formation ?

- Bac+2 (BTS ou DUT chimie).
- Bac+3 (licence professionnelle chimie, assurance qualité…).

Et après

- Après plusieurs années d'expérience et une formation adaptée, peut évoluer vers la fonction de responsable assurance qualité ou vers des métiers de la sécurité ou encore de l'environnement…

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie, la fiche métier détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/technicien-assurance-qualit%C3%A9-hf

Technicien chimiste de recherche (H/F)

Au quotidien

• Sous la responsabilité d'un ingénieur ou d'un chercheur, son rôle est de traduire la théorie en réalité concrète.

• Il (elle) met en œuvre et adapte les propositions formulée au sein de l'équipe de recherche pour préparer de nouveaux produits, de nouveaux matériaux ou mettre en évidence de nouvelles propriétés.

• Il s'appuie sur des équipements et des outils informatiques très performants.

Qualités requises

- Connaissances larges en chimie.
- Qualités de mise en œuvre technique.
- Rigueur.
- Sens aigu de l'observation et de l'analyse.

Lieux de travail

- Avec les équipes de recherche et développement (R&D), de procédés et d'analyse. Il (elle) travaille en laboratoire, dans de très nombreux secteurs d'activité : chimie, pharmacie, agrochimie, cosmétique, agroalimentaire, pétrole, plasturgie, caoutchouc, énergie, automobile, aéronautique, matériaux, nucléaire, environnement…

Salaire mensuel moyen

- Débutant : 1 400-1 700 €.

Quelle formation ?

- Bac+2 (BTS ou DUT).
- Bac+3 (licence professionnelle).
- Ces diplômes peuvent être obtenus en formation initiale ou par l'apprentissage.

Et après

- Peut prendre d'avantage de responsabilités et gagner en autonomie en tant que technicien.
- Après plusieurs années d'expérience et des formations professionnelles complémentaires, peut évoluer vers le statut de chercheur.
- Des évolutions vers d'autres secteurs sont possibles : l'analyse, les procédés, la production, le commercial, l'environnement.

Pour en savoir plus

- Consulter dans Mediachimie, la fiche métier détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/technicien-chimiste-hf

Technicien environnement (H/F)

Au quotidien :
• Il (elle) a un rôle de prévention, de contrôle et d'intervention.
• En cas de dysfonctionnement ou d'incident, il (elle) participe à l'analyse du problème, à l'impact potentiel sur l'environnement et à la mise en place des mesures correctives.
• Participe à la formation du personnel.
Le respect de l'environnement est fondamental pour toute entreprise ayant une activité chimique.

Lieux de travail

- Principalement au sein des laboratoires de recherche, des ateliers de procédés ou de production et aussi auprès de tous les collaborateurs de l'entreprise.
- Présent dans de très nombreux secteurs d'activité : chimie, cosmétique, peinture, colle, matériaux, agrochimie, verre, élastomère, pharmacie, énergie, nucléaire, automobile, aéronautique, environnement.

Salaire moyen mensuel

- Débutant : 1 400-1 700 €.

Quelle formation ?

- Bac+2 (BTS chimie, bio-analyse et contrôle ou DUT chimie, génie biologique).
- Bac+3 (licence professionnelle avec enseignement en chimie, analyse et environnement).
- Ces diplômes peuvent être obtenus en formation initiale ou par l'apprentissage.

Qualités requises ?

- Compétences en chimie et en analyse physico-chimique ou biologique.
- Réactivité.
- Rigueur.
- Sens de la communication.
- Pédagogue.

Et après

- Après plusieurs années d'expérience et formations adaptées, peut évoluer vers la fonction de responsable environnement ou vers des métiers de la sécurité ou de traitement des effluents et des déchets…

Pour en savoir plus

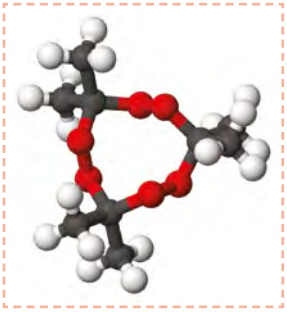
- Consulter dans Mediachimie, la fiche métier détaillée : http://www.mediachimie.org/fichemetier/technicien-environnement-hf

ÉNIGMES

Des solutions détaillées sont proposées sur le site de Médiachimie dans l'espace éducation collège (mediachimie.org).
Le niveau requis pour chaque exercice est précisé grâce au symbole : ★ (de la 6e à la 4e) ; ★★ (à partir de la 3e).

TATP★

Léa : « Sais-tu ce qu'est le TATP ? »
Max : « Oui, c'est un explosif très instable, sensible aux chocs, à la friction, à la chaleur etc. »
Léa : « Mais que signifient les lettres TATP ? »
Max : « Elles signifient TriAcétone TriPeroxyde ».
Léa : « Mais de quoi est-ce composé ? »
Max : « La formule chimique du TATP est $C_9H_{18}O_6$. Voici d'ailleurs une représentation de la molécule de TATP ».



(Source de l'illustration Wikipedia).

Sur cette figure, quelles sont les couleurs respectives des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène ?

.....

.....

Réponse : Atomes de carbone : en noir ; atomes d'hydrogène : en blanc ; atomes d'oxygène : en rouge.

Nitrate d'ammonium★

Max : « N'est-ce pas le nitrate d'ammonium, un engrais, qui a provoqué l'explosion d'AZF à Toulouse ? »
Léa : « Oui, avec un apport de chaleur, le nitrate d'ammonium se décompose en trois gaz : de l'azote, de la vapeur d'eau et de l'oxygène. Cela provoque un accroissement de volume très important qui provoque un effet de souffle phénoménal. En se décomposant à une température de 300 °C, 1 gramme de nitrate d'ammonium donne lieu à un dégagement de gaz d'un volume égal à 981 cm^3 ».

Sachant que dans l'usine d'AZF, environ 350 tonnes de nitrate d'ammonium ont explosé, quelle volume de gaz a résulté de cette explosion ?

.....

.....

Réponse : 343 350 000 000 cm^3 = 343 350 m^3.

Micro ou nano ?★

« Les nanomatériaux sont des matériaux qui mesurent quelques microns ? » demande Max.
Léa : « Non, il ne faut pas confondre le micron, synonyme de micromètre dont le symbole est µm (la première lettre est la lettre grecque mu pour ne pas confondre avec le millimètre) et le nanomètre (abréviation nm), qui est mille fois plus petit ! »
Max : « Oui, je sais que pour les scientifiques, un nano-objet est un objet dont les dimensions sont inférieures à 40 nanomètres ».

Sachant qu'un micromètre (un micron) est égal à un millionième de mètre, quelle fraction du mètre ne doivent pas dépasser les dimensions d'un objet pour qu'il soit considéré comme un nano-objet ?

.....

.....

Réponse : 1/25 000 000 m (un vingt-cinq millionième de mètre).

Coup de pouce

Un millième de millionième est égal à un.

Chauffage électrique ou au bois ?★

Max : « Notre logement est doté d'un chauffage électrique. Il paraît que cela revient plutôt cher ! ».

Léa : « Chez nous, on se chauffe en partie avec un poêle à bois, mes parents disent que cela allège la facture de chauffage, même si les fumées peuvent aussi être polluantes. »

Les différents combustibles ou modes de chauffage se comparent en équivalent-pétrole. Ainsi 1 kg de bois sec a un pouvoir calorifique qui correspond à 0,33 kg de pétrole (0,33 kep ou kilo-équivalent-pétrole), tandis qu'un kWh d'électricité a un pouvoir calorifique équivalent à 0,086 kg de pétrole (0,086 kep).

Coup de pouce

$2^{10} = 1\,024$;
$2^{15} = ?$

En supposant qu'un kWh d'électricité coûte 15 centimes d'euro et 1 kg de bois sec 10 centimes d'euro, quelle économie réalise-t-on en brûlant 500 kg de bois au lieu d'utiliser l'énergie électrique ?

.....

.....

Réponse : environ 237 euros.

Empreintes digitales★★

« Depuis quand utilise-t-on les empreintes digitales pour identifier les individus ? » demande Max.

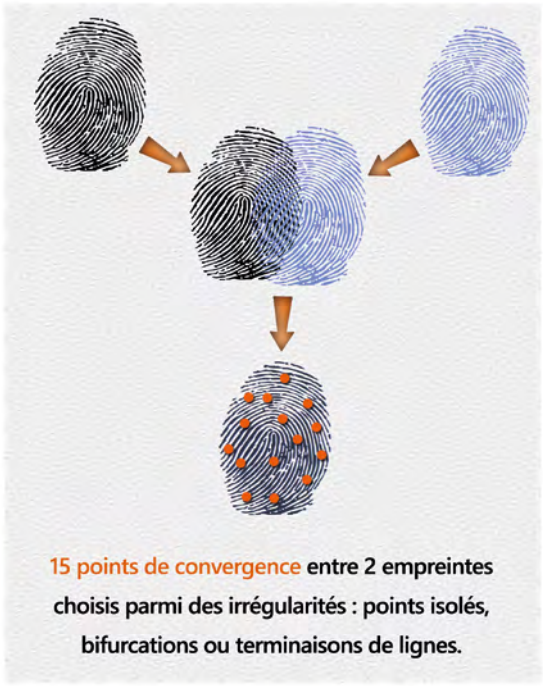
Léa : « C'est le britannique William Herschel (1833-1917) qui, le premier, comprit l'intérêt de ces empreintes à des fins d'identification. Il les utilisa pour éviter qu'un soldat de l'Empire britannique ne puisse percevoir plusieurs fois sa solde sous des identités différentes ».

« Mais, aujourd'hui, comment un logiciel de comparaison des empreintes procède-t-il ? » demande Max.

Léa : « C'est simple, le logiciel compare quinze points de l'empreinte à identifier avec les mêmes points des empreintes déjà répertoriées par la police, et si ces quinze points coïncident avec ceux de la nouvelle empreinte, le résultat est considéré comme positif. »

Max : « Est-il possible que les quinze points coïncident pour deux personnes différentes ? »

« Oui, mais la probabilité est faible. En cas de coïncidence des quinze points, il faut encore qu'un œil humain les compare », répond Léa.



15 points de convergence entre 2 empreintes choisis parmi des irrégularités : points isolés, bifurcations ou terminaisons de lignes.

Quelle est cette probabilité ?
On suppose que, pour chaque point comparé, la coïncidence et la non-coïncidence sont équiprobables.

.....

.....

Réponse : $1/(2^{15})$, soit environ un sur trente-deux mille.

Coup de pouce

Calculer l'équivalent pétrole de 500 kg de bois, puis le nombre de kWh correspondant à cet équivalent pétrole.

Départs d'incendies★★

Léa : « Comment la police scientifique peut-elle prouver qu'un incendie est d'origine criminelle ? ».
« C'est simple, répond Max, elle analyse les résidus en différents points du lieu incendié, ce qui lui permet de retrouver le ou les points de départ de l'incendie, et le produit éventuel qui a déclenché cet incendie (essence, white spirit ou autre…). En effet, chaque produit utilisé a des caractéristiques propres. L'essence la plus courante, par exemple, contient 20 à 30 % d'alcanes ».
Max : « Oui, je sais qu'il existe différents types d'essence, comme l'essence sans plomb 95 ou l'essence sans plomb 98, mais que signifient ces chiffres ? »
Léa : « Le nombre 95 ou 98 est l'indice d'octane de l'essence. L'octane fait partie des alcanes. Dans une essence d'indice 95, les alcanes comportent 95 % d'octane et 5 % d'heptane ».

Coup de pouce

Prendre 5 % d'un nombre revient à multiplier ce nombre par 0,05.

Quel est le pourcentage d'heptane dans une essence sans plomb 95 qui contient 25 % d'alcanes ?

.....

.....

Réponse : 1,25 %.

L'eau de la Seine★★

« Avec les stations d'épuration, l'eau des rivières devrait rester relativement propre ! » remarque Léa.
Max : « Les stations d'épuration retiennent bien certains macro-polluants, mais beaucoup moins bien les micro-polluants, comme les résidus de certaines substances consommées par l'homme ou les médicaments, par exemple ! »
Le tableau ci-dessous donne les concentrations en caféine et en aspirine relevées dans la Seine un jour de septembre et un jour de novembre 2008.

date	09/09/2008	13/11/2008
caféine	315 ng/L	0,53 µg/L
aspirine	0,023 µg/L	77 ng/L

Quelle a été la variation (en %) de la concentration de l'eau en caféine entre le 9 septembre et le 13 novembre ?

.....

.....

Quelle a été la variation (en %) de la concentration de l'eau en aspirine entre le 9 septembre et le 13 novembre ?

On précise qu'un nanogramme (ng) est un milliardième de gramme et un microgramme (µg) un millionième de gramme.

.....

.....

.....

.....

.....

Coup de pouce

Commencer par convertir toutes les données dans la même unité, puis calculer la variation de concentration entre les deux dates.

Réponse : le taux de caféine dans l'eau a augmenté d'environ 68 % entre les deux dates.
Le taux de caféine dans l'eau a augmenté d'environ 235 % entre les deux dates.

Trichloréthylène★★

Max : « Pour dégraisser mes pièces de Meccano, j'utilise le trichlo (abréviation de *trichoréthylène*) de l'atelier de papa, mais l'odeur me monte à la tête ! »

Léa : « Tu es fou, c'est un produit dangereux et considéré comme cancérigène ! Les usines qui en utilisent ne doivent pas dépasser un taux dans l'air de 10 ppm (parties par million) ».

Sachant que dans des conditions moyennes de température et de pression, 1 mg de trichloréthylène par litre d'air correspond à une concentration égale à 0,18 ppm, quelle doit être la masse maximale du produit par mètre cube d'air ?

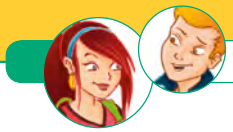
.....

.....

Coup de pouce

Utiliser la proportionnalité pour calculer la masse de trichloréthylème correspondant à 1 ppm.

Réponse : environ 55 mg/m^3.



Du méthane dans l'atmosphère★★

Max : « Le gaz carbonique est un gaz à effet de serre, mais est-ce le seul ? »
Léa : « Non, il y a aussi le méthane. L'atmosphère en contient beaucoup moins, mais à volume égal, l'effet de serre qu'il provoque est environ 25 fois plus important que celui causé par le gaz carbonique ! »
L'atmosphère contient environ 0,039 % de dioxyde de carbone (c'est le nom chimique du gaz carbonique) et environ 0,00018 % de méthane.

En supposant que les autres gaz à effet de serre soient en quantités négligeables et en prenant en compte l'effet 25 fois plus important du méthane par rapport à l'effet du dioxyde de carbone, quelle est la part du méthane dans l'effet de serre ?

Coup de pouce

Dans 1 m^3 d'air, quel est, en moyenne, le volume de gaz carbonique et le volume de méthane ? Ce volume de méthane aura le même effet que quel volume de gaz carbonique ?

.....

.....

Réponse : environ 10 %.

Darcy et la perméabilité des roches★★

Léa : « Quelle est la différence entre le gaz naturel conventionnel et le gaz de schiste ? »
Max : « Le gaz naturel conventionnel n'est pas resté prisonnier de la roche-mère dans laquelle il s'est formé. Il a migré hors de cette roche, alors que le gaz ou le pétrole dit « de schiste » est resté prisonnier de la roche-mère. C'est lié à la perméabilité de cette roche-mère. »
La *perméabilité* d'une roche se mesure en *Darcy*, unité qui porte le nom de l'ingénieur Henry Darcy (1803-1858).
Un Darcy (1 D) correspond à la perméabilité d'un corps dans lequel un fluide de viscosité équivalente à celle de l'eau s'écoule à une vitesse de 1 cm par seconde en étant soumis à une pression d'une atmosphère.

Cette perméabilité est inversement proportionnelle à la viscosité du fluide.

À quelle vitesse un pétrole de viscosité 2,5 fois celle de l'eau migre-t-il dans une roche de perméabilité égale à 0,05 mD (milliDarcy) ?

.....

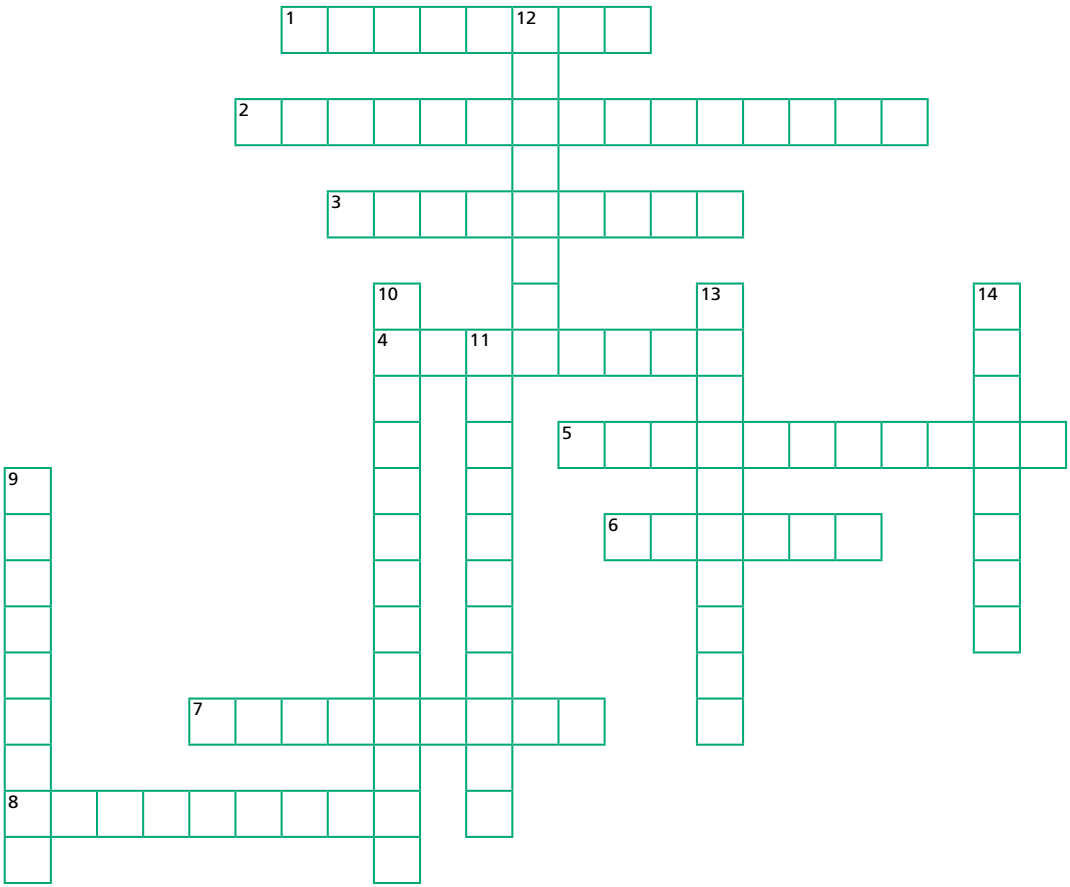
.....

Réponse : 20 µm/s.

Coup de pouce

Calculer à quelle vitesse s'écoulerait de l'eau dans cette roche, puis tenir compte de la viscosité.

MOTS CROISÉS



Définitions

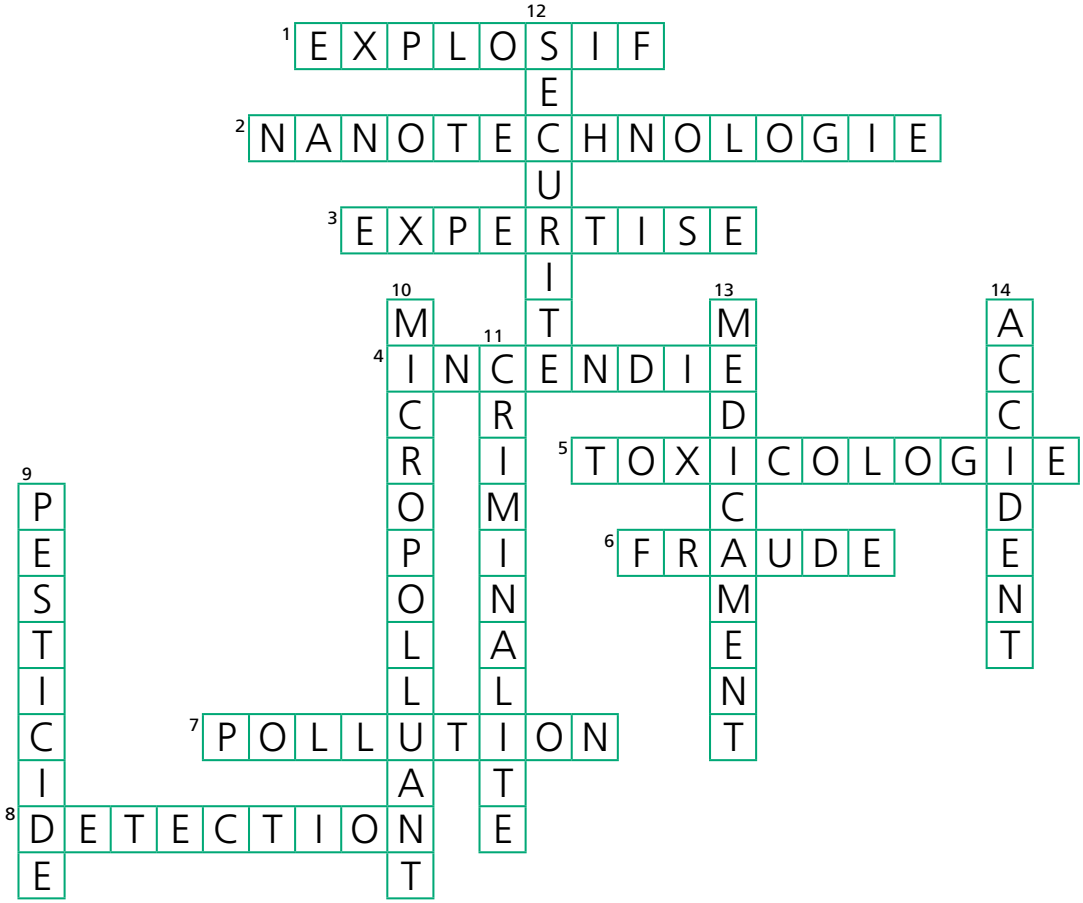
Horizontalement :

1. Mélange de corps susceptible de dégager en un temps très court un grand volume de gaz à haute température.
2. Étude de structures ou de matériaux à l'échelle de moins de 40 nanomètres.
3. Estimation faite par un expert.
4. Feu violent et destructeur.
5. Discipline qui étudie les effets néfastes d'une substance.
6. Action destinée à tromper autrui.
7. Dégradation d'un écosystème par l'introduction de substance ou de radiations.
8. Action de détecter.

Verticalement :

9. Substance chimique destinée à lutter contre des organismes considérés comme nuisibles.
10. Substance polluante à des concentrations infimes.
11. Ensemble d'actes illégaux, délictueux ou criminels.
12. Sentiment d'être à l'abri de tout danger.
13. Substance présentant des propriétés curatives ou préventives vis-à-vis des maladies.
14. Événement non souhaité qui entraîne des dommages.

Solution :


1 EXPLOSIF
2 NANOTECHNOLOGIE
3 EXPERTISE
4 INCENDIE
5 TOXICOLOGIE
6 FRAUDE
7 POLLUTION
8 DETECTION
9 PESTICIDE
10 MICROPOLLUANT
11 CRIMINALITE
12 SECURITE
13 MEDICAMENT
14 ACCIDENT